



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Octubre– Diciembre 2025
Volumen 38 N° 4
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melica

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico

DOAJ

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. 38-4. Octubre-Diciembre, 2025 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



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



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

 SciELO

 latindex

 Dialnet

 melica

 REDIB
Red Iberoamericana
de Innovación y Conocimiento Científico

 DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Caracterización del sistema productivo de tacaco (<i>Sechium tacaco</i>) en Cartago, Costa Rica Characterization of the tacaco (<i>Sechium tacaco</i>) production system in Cartago, Costa Rica José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto	3
Optimización de protocolo de micropagación de variedades de <i>Fragaria x ananassa</i> , cultivadas en la zona norte de Cartago Optimization of the micropropagation protocol for <i>Fragaria x ananassa</i> varieties cultivated in the northern region of Cartago Alison Salas-Campos, Jason Perez-Chavez, Giovanni Garro-Monge	22
La mosca barrenadora (<i>Cochliomyia hominivorax</i>) y su reaparición reciente en Costa Rica: una actualización del tema The New World Screwworm (<i>Cochliomyia hominivorax</i>) and Recent Reappearance in Costa Rica: an update Jose Adrián Alpízar-Ramírez, Melody Dianne Campos-Pérez, Michael Damián Meléndez-Álvarez, Kendall Mauricio Ramírez-Zuñiga	34
Ánalisis de la aplicación del veneno de familias de arañas tropicales para diferentes terapias farmacológicas Analysis of the application of venom from tropical spider families for different pharmacological therapies Eunice Córdoba-Fernández, Gaudy Ariadna Hernández-Chang, Justine Andrea Rojas-Aguilar, David Salazar-Solano, Yanice Segura-Álvarez	44
La disfunción de la Autofagia en la enfermedad del Alzheimer: Bioquímica y futuro terapéutico Autophagy dysfunction in Alzheimer's disease: Biochemistry and therapeutic future Ariana Serrano-Monge, Daniel Álvarez-Brenes, Isaac Calderón-Blanco, Sofía Jiménez-Murillo, Raquel Montoya-Mata	54
Desarrollo de un Plan Director de Seguridad para infraestructuras tecnológicas virtuales en instituciones educativas públicas: aplicación de COBIT® 2019 Development of a Security Master Plan for Virtual Technological Infrastructures in Public Educational Institutions: Application of COBIT® 2019 Pablo Roberto Sandoval-Barrantes.....	66

Uso de rayos gamma para la producción de mutantes de <i>Echeveria</i> sp. para potenciar el futuro beneficio del productor nacional	
Use of gamma rays to produce <i>Echeveria</i> sp. mutants to boost the future profit of the national producer	
<i>Girlany Quesada-Cordero, Frank Carlos Barrientos-Alfaro, Walter Vargas-Segura, Jason Pérez</i> 87	
Revisión de la contaminación por microplásticos: una descripción del impacto en la salud humana	
Review of microplastic pollution: a description of the impact on human health	
<i>Daniela Santamaría-Villalobos, Karol Jineth Sanchez-Matallana, Jovanna Acero-Godoy</i> 99	
Gestión ambiental en la subcuenca del río Rincón para preservar la calidad del agua superficial en La Península de Osa	
Environmental Management in the Rincón River Sub-Basin to Preserve Surface Water Quality in the Osa Peninsula	
<i>Guillermo Calvo-Brenes, Laura Robleto-Villalobos</i> 121	
Aplicación de la metodología Lean seis sigma para la recuperación del PVC en la empresa Conducen SRL alineado al modelo de economía circular	
Application of the Lean six sigma methodology for the recovery of PVC in the Conducen SRL company aligned with the circular economy model	
<i>Juan Manuel Arias-Araya, Jorge Francisco Rovira-Guzmán, Hector Jesus Ramirez-Mora, Esteban Alberto Cárdenas-Solorzano</i> 132	
Estudio computacional del comportamiento de un calentador de agua con una resistencia tipo C	
Computational study of the behavior of a water heater with a type C resistance	
<i>Carlos A. Jiménez-Carballo</i> 157	
Estrategias de manejo del riego y la nutrición en tomate hidropónico bajo invernadero: efecto en el rendimiento y la eficiencia hídrica	
Irrigation and nutrition management strategies in greenhouse hydroponic tomato: effect on yield and water efficiency	
<i>Freddy Soto-Bravo</i> 170	
¿Energía nuclear, biomásica o eólica? Una aproximación desde el enfoque de ciclo de vida	
Nuclear, biomass, or wind energy? An approach from the life cycle perspective	
<i>Daniel Rodriguez-Rivas, Deborah Colombo-Vegas, Julio Rojas-Gómez, Gustavo Richmond-Navarro</i> 182	
Caracterización de rendimiento computacional en plataformas embebidas para aplicaciones de Edge AI en modelos de detección de personas	
Performance characterization on embedded systems for Edge AI person-detection models	
<i>Laura Cabrera-Quirós, Kimberly Orozco-Retana</i> 191	
Gestión del conocimiento mediante observatorios	
Knowledge management through observatories	
<i>Giannina Ortiz-Quesada, Agustín Francesa-Alfaro, Alonso Poveda-Montoya, Gustavo Rojas-Moya</i> 202	

Caracterización del sistema productivo de tacaco (*Sechium tacaco*) en Cartago, Costa Rica

Characterization of the tacaco (*Sechium tacaco*) production system in Cartago, Costa Rica

José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 12 de febrero, 2025
Fecha de aprobación: 6 de junio, 2025

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Caracterización del sistema productivo de tacaco (*Sechium tacaco*) en Cartago, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 3-21.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7581>

1 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Investigador de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

 jose.mongeperez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>

2 Máster en Administración Educativa, Investigadora de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica..

 michelle_loria@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>



Palabras clave

Cucurbitaceae; Centroamérica; fertilización; plagas; enfermedades; precio.

Resumen

El objetivo del trabajo fue realizar una caracterización del sistema productivo de tacaco (*Sechium tacaco*). La investigación se desarrolló en los cantones de Paraíso y Alvarado, provincia de Cartago, Costa Rica, entre setiembre de 2021 y diciembre de 2022. Se realizaron 15 entrevistas semiestructuradas a productores de tacaco, sobre diversos temas relacionados con el sistema de producción de esta hortaliza. Se obtuvieron datos sobre: siembra, tutorado, época de siembra, poda y deshoja, fertilización, combate de plagas y enfermedades, riego, rotación y asociación de cultivos, cosecha, poscosecha, y comercialización. Se concluye que la producción de tacaco está en manos de pequeños productores, los cuales cuentan con un importante acervo cultural relacionado con la producción de esta hortaliza. Este trabajo constituye el primer estudio sobre la caracterización del sistema productivo de tacaco en Costa Rica.

Keywords

Cucurbitaceae; Central America; fertilization; pests; diseases; price.

Abstract

The objective of the work was to carry out a characterization of the tacaco (*Sechium tacaco*) production system. The research was carried out in the cantons of Paraíso and Alvarado, province of Cartago, Costa Rica, between September 2021 and December 2022. 15 semi-structured interviews were conducted with tacaco growers on various topics related to the production system of this vegetable. Data was obtained on: planting, staking, planting time, pruning and leaf removal, fertilization, pest and disease control, irrigation, crop rotation and association, harvest, post-harvest, and marketing. It is concluded that the production of tacaco is in the hands of small growers, who have an important cultural heritage related to the production of this vegetable. This work constitutes the first study on the characterization of the tacaco production system in Costa Rica.

Introducción

El tacaco, [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], es una especie vegetal de la familia Cucurbitaceae que presenta una planta herbácea, trepadora, anual y monoica; sus frutos se consumen como alimento [1] [2] [3]. Es una especie endémica de Costa Rica [4] [5], y se ha sugerido que debe ser considerada como patrimonio natural de este país [1]. Este cultivo se practica preferentemente en zonas con altitudes entre 500 y 1800 msnm, y se puede realizar prácticamente en cualquier época del año [1] [6] [7].

En 1994 se realizó una descripción morfológica de los órganos vegetativos y reproductivos de *S. tacaco* [8]. También, entre 1992 y 1999 se estudió la reproducción por semilla [9] [10], así como la fenología del cultivo [11] y su capacidad productiva [12] [13]. A partir de 2017, se han llevado a cabo otras investigaciones en esta hortaliza, relacionadas con características de los frutos [1] [6] [7] [14] [15] [16], las plántulas [17] [18] [19], y la propagación vegetativa [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26], así como su comportamiento poscosecha [27].

La principal zona productora de tacaco en Costa Rica, al menos desde el año 2001, es el cantón de Paraíso, provincia de Cartago [1]. Sin embargo, en años recientes el cultivo también se ha expandido a algunas zonas del cantón de Alvarado, provincia de Cartago, la cual se ubica a una mayor altitud; este proceso podría estar relacionado eventualmente con el calentamiento global y el cambio climático (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar).

El objetivo del trabajo fue realizar una caracterización del sistema productivo de tacaco en Cartago, Costa Rica.

Metodología

La investigación se desarrolló en los cantones de Paraíso y Alvarado, provincia de Cartago, Costa Rica, entre setiembre de 2021 y diciembre de 2022. Estos cantones incluyen la principal zona de producción de tacaco a nivel comercial en Costa Rica [1]. Se realizaron 15 entrevistas semiestructuradas, a productores de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], cuyas parcelas se ubicaban en las localidades de El Yas, La Flor, Santiago, Asentamiento Arrabará, Lapuente y Piedra Azul (todos del cantón de Paraíso), así como en Cervantes (cantón de Alvarado).

Las entrevistas trataron los siguientes temas relacionados con el sistema de producción de esta hortaliza: aspectos generales, siembra, tutorado, época de siembra, poda y deshoja, fertilización, combate de plagas y enfermedades, riego, rotación y asociación de cultivos, cosecha, poscosecha, y comercialización. La información obtenida se tabuló y se analizó para organizarla por áreas temáticas. Se obtuvo la frecuencia absoluta y la frecuencia relativa (%), para cada categoría, al igual que la moda para varias de las características evaluadas.

Resultados y discusión

Aspectos generales

El 80% de los productores de tacaco entrevistados tenían más de 50 años de edad (cuadro 1). Este hallazgo está en concordancia con los datos del Censo Agropecuario 2014 en Costa Rica, que indicó que, en ese año, la edad promedio de las personas agricultoras era de 53,9 años [28]. La mayor parte (33%) de los agricultores cultivaban entre 21 y 30 plantas de tacaco en su finca; además, el 87% de ellos tenía 40 plantas o menos, lo que significa que la producción de esta hortaliza estaba en manos de pequeños agricultores. Por otra parte, más de la mitad de los agricultores (53%) tenía más de 20 años de experiencia en el cultivo de tacaco, lo que constituye un importante acervo cultural. En el cultivo de chayote (*Sechium edule*) en la zona de Paraíso de Cartago, también se informó que la mayor parte de los productores (53%) tenían más de 20 años de experiencia en ese cultivo [29]; además, en un estudio con cinco productores de tacaco en la misma zona, se estableció que todos ellos tenían 20 años o más de experiencia en agricultura [30].

Cuadro 1. Características generales del sistema productivo de tacaco (n=15).

Característica	Categorías			
	Menos de 50	50-60	Más de 60	
Edad de la persona productora (años)	3 (20)	6 (40)	6 (40)	
<hr/>				
Número de plantas de tacaco sembradas	Menos de 5	5-10	11-20	21-30
	1 (7)	2 (13)	3 (20)	5 (33)
<hr/>				
¿Desde hace cuántos años siembra tacaco?	5-10		11-20	Más de 20
	5 (33)		2 (13)	8 (53)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

De las 15 personas entrevistadas, únicamente una de ellas era mujer (7%), lo que representa claramente una participación minoritaria, que ilustra la disparidad de género en la producción de tacaco. Este fenómeno también se registró en el Censo Agropecuario 2014, donde se informó que, del total de fincas registradas a nombre de personas físicas en Costa Rica, únicamente el 15,6% de las personas productoras eran mujeres [28].

En su finca, las personas agricultoras también tenían otros cultivos, mayoritariamente chayote (93% de los productores), ayote (47%), vainica (47%), y en menor medida, jaiba (también llamada caiba) (27%), y frijol tierno (20%), entre otros (cuadro 2). Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería, este sistema productivo se identifica como “agricultura diversificada”, caracterizado por ser realizado por pequeños productores, con al menos dos prácticas sostenibles en sus cultivos, en cuyas fincas agrícolas se combinan diferentes cultivos, con el fin de aumentar su oferta al mercado, maximizar los recursos, y tener productos fuera de temporada que aumenten sus ingresos [31].

Cuadro 2. Otros cultivos presentes en las fincas de tacaco.

Cultivo	Número de productores (n=15)
Chayote (<i>Sechium edule</i>)	14 (93)
Ayote (<i>Cucurbita</i> sp.)	7 (47)
Vainica (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	7 (47)
Jaiba (<i>Cyclanthera pedata</i>)	4 (27)
Frijol tierno (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	3 (20)
Mostaza (<i>Brassica juncea</i>)	2 (13)
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	1 (7)
Berenjena (<i>Solanum melongena</i>)	1 (7)
Cacao (<i>Theobroma cacao</i>)	1 (7)
Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	1 (7)
Chile dulce (<i>Capsicum annuum</i>)	1 (7)
Culantro (<i>Coriandrum sativum</i>)	1 (7)
Frijol cubá (<i>Phaseolus coccineus</i>)	1 (7)
Granadilla (<i>Passiflora ligularis</i>)	1 (7)
Maracuyá (<i>Passiflora edulis</i>)	1 (7)
Orégano (<i>Origanum vulgare</i>)	1 (7)
Suquini (<i>Cucurbita pepo</i>)	1 (7)
Tomate cherry (<i>Solanum lycopersicum</i> var. <i>cerasiforme</i>)	1 (7)
Tomillo (<i>Thymus vulgaris</i>)	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada cultivo. El nombre entre paréntesis corresponde al nombre científico del cultivo.

Siembra

Prácticamente la mitad de los productores de tacaco (47%) optó por la propagación natural por semilla, es decir, esperaba a que las semillas germinaran naturalmente en su parcela (cuadro 3); las plántulas resultantes se conocen técnicamente como plantas voluntarias [32]. Además, el 73% de los agricultores no realizaba la extracción de la semilla del fruto, para sembrarla

posteriormente, y el 80% no le hacía ningún tratamiento a la semilla. Por otra parte, el 33% de ellos realizaba el trasplante de plántulas (como práctica única, o en conjunto con la propagación natural), y un 47% indicó que hacía semillero (almácigo).

Cuadro 3. Características de la siembra de tacaco (n=15).

Característica	Categorías						
¿Cómo realiza la siembra de las semillas?	Natural	Trasplante	Natural y trasplante	En bolsas	En el suelo		
	7 (47)	3 (20)	2 (13)	1 (7)	2 (13)		
¿Cómo extrae las semillas de los frutos?	No lo hace	A partir del fruto seco		Deshidrata el fruto			
	11 (73)	1 (7)		3 (20)			
¿Le hace algún tratamiento a la semilla antes de sembrarla?	No	Le quita la testa		La seca al sol			
	12 (80)	2 (13)		1 (7)			
¿Cómo selecciona la semilla?	No lo hace	Poca fibra en el mesocarpo					
	14 (93)	1 (7)					
¿Hace semillero o almácigo?	No	Sí					
	8 (53)	7 (47)					
¿A qué distancia siembra una planta de otra?	Menos de 8 metros	8 metros	Más de 8 metros				
	6 (40)	5 (33)	4 (27)				
¿Qué tipo de tacaco siembra?	Con espinas	Con espinas y sin "estopa"	Cualquiera				
	9 (60)	1 (7)	5 (33)				

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

El 13% de los agricultores afirmó que realizaba la escarificación de la semilla; para llevar a cabo esta práctica, ellos aconsejaban quitar la testa, con el cuidado de no tocar el embrión ni los cotiledones, o quitar apenas un extremo de la testa. Varios productores mencionaron que, antes de sacar la semilla, dejaban que el fruto se deshidratara por algunas semanas; algunos ponían los frutos al sol, pero cubiertos por una capa de hojas.

Algunos agricultores ponían un grupo de frutos de tacaco en un hoyo en el suelo, e incluso los cubrían con hojarasca o burucha, y esperaban a que germinaran las plántulas. Varias personas mencionaron que hacían el almácigo en una caja plástica, y luego trasplantaban las plántulas (5-15 cm de altura) en bolsas plásticas, para luego sembrar en el campo las plántulas de mayor tamaño (1 m de altura); dos de estas personas aseguraron tener un 100% de éxito en el trasplante al usar esta técnica.

Por otra parte, el 93% de los agricultores no realizaba ningún tipo de selección de la semilla, y solamente un productor afirmó que escogía semillas provenientes de frutos con poca fibra (llamada "estopa") en el mesocarpo.

Con respecto a la distancia de siembra, un 40% indicó que utilizaba menos de 8 m entre plantas (desde un mínimo de 2 m), un 33% usaba 8 m, y un 27% sembraba a más de 8 m entre plantas (hasta 10, 12 o 15 m).

El 60% de los productores afirmó que prefería sembrar tacacos con espinas en el fruto, pero un 33% no tenía ninguna preferencia en el tipo de tacaco a sembrar, y solo una persona indicó que seleccionaba tacacos con espinas y poca fibra en el mesocarpo. Algunos productores indicaron que los tacacos de frutos con espinas eran más productivos, en comparación con los que no tienen espinas. En un estudio anterior con cinco productores de tacaco en Paraíso, Cartago, se informó que ellos cultivaban tacacos con espinas, debido a que consideraban que tenían una mayor productividad y una mayor resistencia a plagas y enfermedades, aunque reconocieron también que los frutos sin espinas eran más fáciles de manipular [30].

En cuanto a la propagación vegetativa de tacaco, ningún productor utilizaba esquejes para sembrar, ni conocía a algún productor que lo hiciera; en este sentido, es importante indicar que estas entrevistas se realizaron antes de que se conocieran los resultados de las investigaciones sobre reproducción de tacaco mediante esquejes [22] [24] [23] [25] [26].

Un agricultor mencionó que se recomendaba sembrar tacaco en parcelas en las que no exista mucha afectación por el viento, pues esto causa mucho daño a las plantas. Otros productores mencionaron que el tacaco prefiere suelos con alto contenido de materia orgánica.

Tutorado

Todos los productores afirmaron que utilizaban la barbacoa como sistema de tutorado de las plantas de tacaco. La mayor parte de los agricultores (47%) usaba una altura de barbacoa de 2 m (cuadro 4). Entre los materiales utilizados para confeccionar la barbacoa se mencionaron postes vivos de poró (*Erythrina* spp.) o de madero negro (*Gliricidia sepium*), postes aserrados de ciprés u otras especies, cañas de bambú, alambre de púas, mecate, y alambre liso.

Cuadro 4. Altura de la barbacoa en tacaco.

Altura (m)	Número de productores (n=15)
1,6-1,99	6 (40)
2,0	7 (47)
2,01-2,5	2 (13)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada altura; el número en negrita corresponde a la moda.

Época de siembra

La mayor parte de los productores (60%) indicó que la siembra se podía hacer en cualquier mes del año (cuadro 5); lo mismo sucedió con respecto a la época para realizar el trasplante (87% de los productores). Todas las personas manifestaron que realizaban o habían realizado en algún momento la práctica del trasplante; además, la mayor parte de las personas entrevistadas (53%) afirmó que obtuvo entre 90 y 100 % de éxito en el trasplante.

Cuadro 5. Características de la época de siembra en tacaco (n=15).

Característica	Categorías			
¿En qué meses acostumbra sembrar las semillas?	Cualquiera	Mayo	Agosto-Setiembre	No lo hace
	9 (60)	2 (13)	1 (7)	3 (20)
¿En qué meses acostumbra trasplantar las plántulas?	Cualquiera	Mayo	Agosto-Setiembre	
	13 (87)	1 (7)	1 (7)	
¿Qué porcentaje de éxito tiene en el trasplante?	90-100	80	60	50
	8 (53)	1 (7)	1 (7)	3 (20)
¿Toma en cuenta la fase de la luna para realizar la siembra o el trasplante? ¿De qué forma?	No	Sí, en fase menguante		
	9 (60)	6 (40)		

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

Para el trasplante, los agricultores aconsejaban sacar las plántulas con “adobe” (porción de tierra alrededor de las raíces), para después sembrarlas en el sitio definitivo (se debe aflojar bastante el suelo antes de la siembra), así como asegurar el suministro de agua en ese momento y durante los días siguientes, para procurar el éxito del trasplante. Algunos productores aconsejaban trasplantar las plántulas con una altura máxima de tallo de 60 cm, pues si son más grandes el éxito disminuye. Dos personas indicaron que es mejor trasplantar plántulas con un máximo de 15 cm de altura de tallo, pues en este tipo de plántula el éxito es casi de 100%, pero disminuye a un 40% en plantas más grandes. Además, las personas entrevistadas aconsejaban aplicar gallinaza o cualquier otro tipo de materia orgánica en el hoyo de siembra del tacaco. Un agricultor mencionó que se le debe quitar el brote a la plántula al momento de trasplantarla, para que el tallo se ramifique, y también que se debe cubrir la planta con un poco de follaje seco, para que la proteja contra la acción directa del sol durante las siguientes semanas. Otro productor indicó que, al realizar el trasplante, ponía 2-3 plantas por hoyo de siembra.

Por otra parte, la mayoría de los agricultores (60%) no tomó en cuenta las fases de la luna para realizar la siembra o el trasplante, pero un 40% prefería realizar la siembra o el trasplante en la fase menguante. En este sentido, otros investigadores han realizado estudios sobre la influencia de las fases lunares en la agricultura [33], aunque los resultados no son conclusivos y dependen de cada especie vegetal.

Poda, deshoja y riego

La mayoría de los agricultores (87%) manifestó no realizar la práctica de la poda en tacaco, pero el 80% de ellos sí realizaba la deshoja (80%) (cuadro 6). Las personas entrevistadas indicaron que la poda se acostumbraba realizar cuando la planta estaba creciendo mucho pero aún no fructificaba; en este caso, luego de la poda, se iniciaba la cosecha; ellas indicaron que la poda consistía en cortar todas las “puntas” (ápices) de la planta. Una persona indicó que realizaba la poda sobre los ejes principales de la planta para que ramificara más, y que llevaba a cabo esta práctica durante la fase menguante de la luna.

Cuadro 6. Uso de la poda, deshoja y riego en tacaco (n=15).

Característica	Categorías		
¿Realiza podas a las plantas?	No	Sí	
	13 (87)	2 (13)	
¿Realiza deshoja a las plantas?	No	Sí	Sólo si cosecha tacaco tierno
	2 (13)	12 (80)	1 (7)
¿Acostumbra regar el cultivo?	No	Sí	
	5 (33)	10 (67)	

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

En la práctica de la deshoja, los agricultores recomendaban quitar las hojas secas y las amarillas, así como los tallos secos, ya sea con la mano o con ayuda de un cuchillo; la deshoja es beneficiosa para que las aplicaciones foliares sean más efectivas, y para mejorar la sanidad del cultivo al reducir la cantidad de inóculo en el dosel [34]. Las personas entrevistadas indicaron que esta práctica es especialmente útil cuando se cosechan los frutos tiernos (inmaduros). Un agricultor manifestó que, si iba a cosechar únicamente tacaco sazón (maduro), entonces no realizaba la deshoja. En un estudio anterior, con cinco productores de tacaco, solamente dos de ellos (40%) acostumbraban realizar la deshoja [30].

El 67% de los entrevistados manifestó que realizaba la práctica de riego en este cultivo. Este dato contrasta con el del Censo Agropecuario 2014, en el cual se informó que, del total de fincas con producción agrícola en Costa Rica, únicamente el 19,5% de ellas utilizaban el riego; sin embargo, la provincia de Cartago registró el mayor uso de esta práctica, con el 29,8% de las fincas [28]. Los agricultores afirmaron que la práctica del riego se hacía únicamente en los meses más secos (febrero a abril), mediante el sistema de aspersión, o con regadera o manguera, y se realizaba dos veces a la semana. Sin embargo, una persona indicó que no realizaba la práctica del riego, pues esto favorecía la incidencia de enfermedades en el fruto y en las hojas de la planta.

Fertilización

Todas las personas encuestadas indicaron que aplicaban fertilizante al suelo en su cultivo de tacaco. Además, también todas ellas manifestaron que aplicaban fertilizantes foliares en esta hortaliza, tales como: Kadostim, Biovit, Nitrofoska foliar, Ultrafert, 20-20-20, Calcio-boro, multiminerales, polisacáridos, Bayfolan, Nutriverde, metalosato de potasio, Maxi-G, Agrispon, e Hidrocomplex. Inclusive, una persona indicó que realizaba aplicaciones foliares de una solución de azúcar, sobre las plantas de tacaco. El uso generalizado de fertilizantes en el cultivo de tacaco está en consonancia con los resultados del Censo Agropecuario 2014, donde se informó que, del total de fincas en Costa Rica, en el 82,1% de ellas se aplicaban fertilizantes [28].

El 47% de los agricultores indicó que fertilizaba su cultivo de tacaco con una periodicidad de 15-22 días (cuadro 7). Con respecto a la utilización de abono orgánico, un 40% manifestó que no realizaba esta práctica, mientras que otro 40% utilizaba gallinaza; el uso de abonos orgánicos es importante por el aporte de nutrientes a los cultivos en forma de materia orgánica,

y por el mejoramiento de las propiedades físicas y químicas del suelo [35]. Varios productores aplicaban el abono orgánico cada 2-3 meses, especialmente en la época lluviosa, y afirmaron que la planta de tacaco respondía muy bien a esta aplicación.

Cuadro 7. Características de la fertilización en tacaco (n=15).

Característica	Categorías				
	8 días	8-15 días	15 días	15-22 días	22-30 días
¿Cada cuánto hace la fertilización?	1 (7)	1 (7)	4 (27)	7 (47)	2 (13)
¿Aplica abono orgánico? ¿Cuál tipo?	No	Gallinaza	Té de compost	Basura de trapiche	Té de lombriz
	6 (40)	6 (40)	1 (7)	1 (7)	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

Entre los fertilizantes químicos aplicados al suelo, los agricultores indicaron principalmente las fórmulas altas en fósforo, como 10-30-10 y 12-30-8, pues un 87% de ellos las utilizaban (cuadro 8), generalmente durante los primeros meses del cultivo. Por otra parte, el 53% de ellos usaban fórmulas altas en nitrógeno y potasio, como 18-5-15-6-2 y 15-3-31, especialmente cuando la planta estaba en la fase de fructificación.

Cuadro 8. Fertilizantes químicos aplicados al suelo en el cultivo de tacaco.

Fertilizante químico	Número de productores (n=15)
10-30-10 ó 12-30-8	13 (87)
18-5-15-6-2 ó 15-3-31	8 (53)
Hidrocomplex	6 (40)
K-Mag	3 (20)
Urea ó Nutrán	2 (13)
Cal	1 (7)
26-0-26	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada fertilizante químico.

Combate de plagas y enfermedades

El total de las personas entrevistadas consideró que la “pinta” o “peca” del fruto era un problema fitosanitario importante en este cultivo (cuadro 9); algunos agricultores le llaman también “escorchita” o “ascochita”, pues han escuchado que podría ser causada por un hongo del género *Ascochyta*. Esta enfermedad causa un daño estético en el fruto (manchas necróticas sobre la cáscara, y que a veces pueden afectar también la pulpa), que dificulta o limita su comercialización (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar). En el cultivo de chayote (*S. edule*), se presume que *Ascochyta phaseolorum* podría ser el agente causal de una enfermedad que ataca las hojas, tallos, peciolos y frutos de esa hortaliza [36]. Además, otros investigadores habían indicado que *Ascochyta* sp. afectaba las hojas del tacaco [37].

Cuadro 9. Principales problemas fitosanitarios en tacaco.

Problema fitosanitario	Número de productores (n=15)
Pinta o Peca del fruto	15 (100)
Bejuquillo	8 (53)
Pinta de la hoja	4 (27)
Tijerilla	4 (27)
Araña roja	3 (20)
Chinche	2 (13)
Picudo	2 (13)
Abejoncillo	1 (7)
Ardilla	1 (7)
Gusano del fruto	1 (7)
Gusano medidor	1 (7)
Grillo	1 (7)
Hongo en el tallo	1 (7)
Pulguilla	1 (7)
Vaquitas	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada problema fitosanitario.

El segundo problema fitosanitario en importancia, referido por el 53% de los agricultores, fue el “bejuquillo”, que es una enfermedad aparentemente causada por un fitoplasma del subgrupo 16SrI-B, perteneciente al grupo de los “Aster yellows”; este fitoplasma se ha encontrado asociado a los cultivos de chayote (*S. edule*), tacaco (*S. tacaco*), jaiba (*Cyclanthera pedata*), y a la maleza (también de la familia cucurbitácea) llamada *Rytidostylis carthaginensis* [38] [39], vulgarmente conocida como “chanchillo”. Los síntomas de esta enfermedad en las plantas de tacaco corresponden a una severa reducción de tamaño, tanto en hojas como en frutos; se ha identificado a dos especies de insectos (Hemiptera: Cicadellidae), de los géneros *Empoasca* y *Gyponana*, como posibles vectores de este fitoplasma [38] [39]. Tanto la “pinta” del fruto como el “bejuquillo”, fueron mencionadas también como enfermedades en el cultivo de tacaco en otro estudio anterior [30].

Como un dato relevante, ninguna persona encuestada mencionó al caracol como una plaga en el cultivo del tacaco; sin embargo, se ha constatado la presencia de caracoles sobre las hojas, tallos y frutos del tacaco en la zona del presente estudio (J. E. Monge-Pérez, datos sin publicar). En el chayote (*S. edule*), se ha identificado a la especie *Drymaeus recluzianus* (Mollusca: Gastropoda) como plaga asociada a dicho cultivo, en la zona de Paraíso, Cartago, Costa Rica [40]; es posible que esta sea la misma especie hallada en las plantas de tacaco.

Todos los productores indicaron que aplicaban plaguicidas en el cultivo de tacaco. Entre los productos químicos utilizados para el combate fitosanitario, los agricultores mencionaron principalmente fungicidas como procloraz (47% de los entrevistados), azoxistrobina (40%) y benomil (33%), para combatir la “pinta” del fruto (cuadro 10).

Cuadro 10. Productos químicos usados para el combate fitosanitario en tacaco.

Producto químico	Tipo de plaguicida	Número de productores (n=15)
Mirage (procloraz)	Fungicida	7 (47)
Amistar (azoxistrobina)	Fungicida	6 (40)
Benomil, Afungil (benomil)	Fungicida	5 (33)
Picudo, Tripzell (fipronil)	Insecticida	4 (27)
Abamectina, Trespass (abamectina)	Insecticida y Acaricida	3 (20)
Dantox (dimetoato)	Insecticida	3 (20)
Antracol (propineb)	Fungicida	2 (13)
Cobre	Fungicida y Bactericida	2 (13)
Cyrus (cyromazine)	Insecticida	2 (13)
Score (difenoconazol)	Fungicida	2 (13)
Bellis (boscalid + piraclostrobin)	Fungicida	1 (7)
Bravonil (clorotalonil)	Fungicida	1 (7)
Cal	Otro	1 (7)
Cascabel (cipermetrina)	Insecticida y Acaricida	1 (7)
Coyote (permetrina)	Insecticida y Acaricida	1 (7)
Decis (deltametrina)	Insecticida y Acaricida	1 (7)
Evisect (tiociclam hidrogenoxalato)	Insecticida	1 (7)
Lorsban (clorpirifos)	Insecticida	1 (7)
Malation (malation)	Insecticida	1 (7)
Molto (procloraz + propiconazole)	Fungicida	1 (7)
Muralla Delta (imidacloprid + deltametrina)	Insecticida	1 (7)
Talstar (bifentrina)	Insecticida y Acaricida	1 (7)
Thimet (forato)	Insecticida y Acaricida	1 (7)
Tigre (dimetoato + cipermetrina)	Insecticida	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada producto químico. El nombre entre paréntesis corresponde al nombre técnico del producto.

Por otra parte, entre los insecticidas más utilizados se encontraban fipronil (27% de los entrevistados), abamectina (20%) y dimetoato (20%). La mayoría de los agricultores (40%) realizaba el combate fitosanitario cada 8 días (cuadro 11). El uso generalizado de plaguicidas hallado en el cultivo de tacaco, está en consonancia con los hallazgos del Censo Agropecuario 2014, en el cual se informó que, del total de fincas en Costa Rica, el 90,1% utilizaban plaguicidas [28].

Cuadro 11. Frecuencia del combate de plagas y enfermedades en tacaco (n=15).

Característica	Categorías				
	8 días	15 días	15-22 días	15-30 días	No hay dato
¿Cada cuánto realiza el combate de plagas y enfermedades?	6 (40)	4 (27)	2 (13)	2 (13)	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

Rotación y asociación de cultivos

De las personas encuestadas, 11 de ellas (73%) indicaron que acostumbraban rotar el cultivo de tacaco con otros cultivos, y las restantes 4 (27%) no lo hacían. Los cultivos más utilizados para llevar a cabo la rotación con tacaco eran ayote (33% de los productores), chayote (33%) y vainica (33%) (cuadro 12).

Cuadro 12. Cultivos con los cuales se rota el tacaco.

Cultivo	Nombre científico	Número de productores (n=15)
Ayote	<i>Cucurbita</i> sp.	5 (33)
Chayote	<i>Sechium edule</i>	5 (33)
Vainica	<i>Phaseolus vulgaris</i>	5 (33)
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	4 (27)
Jaiba	<i>Cyclanthera pedata</i>	2 (13)
Suquini	<i>Cucurbita pepo</i>	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada cultivo.

Con respecto a la asociación del tacaco con otros cultivos, 9 agricultores (60%) indicaron que no la realizaban, pero 6 de ellos (40%) afirmaron que sí la hacían (cuadro 13); el cultivo más utilizado para asociar con tacaco era el frijol (20% de los entrevistados). Varios productores aconsejaron realizar esta asociación mientras las plantas de tacaco están pequeñas, con el fin de aprovechar el terreno mientras las plantas de tacaco se desarrollan. Una persona indicó que la jaiba y el tacaco se pueden asociar, pues no compiten entre sí, y más bien, cuando se reduce la cosecha del tacaco, entonces la jaiba entra en producción. Otro productor mencionó que no le gustaba asociar tacaco con chayote, pues el tacaco perdía mucha producción. En un estudio anterior, además de los cultivos mencionados en el cuadro 13, se informó de otros cultivos asociados al tacaco, tales como uchuva, suquini, culantro, tomate, chile dulce, y maracuyá [30].

Cuadro 13. Cultivos con los cuales se asocia el tacaco.

Cultivo	Nombre científico	Número de productores (n=15)
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	3 (20)
Ayote	<i>Cucurbita</i> sp.	2 (13)
Jaiba	<i>Cyclanthera pedata</i>	2 (13)
Vainica	<i>Phaseolus vulgaris</i>	2 (13)
Chayote	<i>Sechium edule</i>	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada cultivo.

Cosecha

El 33% de los agricultores indicaron que la planta de tacaco iniciaba su período de cosecha a los 6-7 meses de edad, mientras que otro 33% afirmó que la cosecha iniciaba a los 5-6 meses de edad (cuadro 14); esto contrasta con lo informado por otros investigadores en el año 1999, quienes hallaron que, en Heredia, la cosecha de tacaco inició a los 215 días después de la siembra, alrededor de los 7 meses de edad [41].

Cuadro 14. Características de la cosecha de tacaco (n=15).

Característica	Categorías					
	3-4 meses	4-6 meses	5 meses	5-6 meses	6-7 meses	No hay dato
¿A qué edad de la planta comienza la cosecha de frutos?	3 (20)	1 (7)	3 (20)	2 (13)	5 (33)	1 (7)
¿En qué meses se da la cosecha?	Todo el año		Setiembre a octubre		Diciembre a marzo	
¿Cuántos meses dura la planta produciendo frutos?	13 (87)		1 (7)		1 (7)	
	2-4	4	4-5	5-6	7-8	9-12
¿Con qué frecuencia realiza la cosecha?	5 (33)		2 (13)	1 (7)	5 (33)	1 (7)
	Una vez por semana		Dos veces por semana		2-3 veces por semana	
¿Cuántos kilogramos cosecha por semana?	4 (27)		8 (53)		3 (20)	
	20-40	50	100	100-300	300-800	No hay dato
	2 (13)	1 (7)	4 (27)	3 (20)	2 (13)	3 (20)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada categoría para cada característica; el número en negrita corresponde a la moda.

La mayoría de las personas entrevistadas (87%) mencionó que la cosecha se daba durante todo el año. Por otra parte, un 33% de ellas afirmó que las plantas se mantenían en producción durante 2-4 meses; esto es similar a lo hallado por otros investigadores en Heredia, donde la cosecha de tacaco se extendió por 3 meses [41]. Por otra parte, otro 33% indicó que el período de cosecha era de 5-6 meses. Como comentario adicional, tres personas (20% del total) mencionaron que, hace algunos años, la cosecha se extendía por más tiempo que en la actualidad, hasta por 9 meses. Además, dos personas (13%) indicaron que, si se cosechaba el tacaco tierno, la cosecha se extendía hasta por 8 meses; esto, debido probablemente al menor desgaste fisiológico de la planta.

La mayoría de los agricultores (53%) realizaba dos cosechas por semana. En relación con la cantidad de tacaco cosechado semanalmente, los datos fueron muy variables, debido a la diversa cantidad de plantas que poseía cada agricultor.

El 80% de las personas entrevistadas indicó que, además de frutos sazones, también cosechaba frutos tiernos; varios agricultores indicaron que la cosecha de frutos tiernos se debía realizar de forma más frecuente que la de frutos sazones. En este sentido, una persona mencionó que la venta de frutos tiernos no era rentable.

En cuanto a la cosecha del tacaco sazón, cada agricultor tenía su propio método, y algunos combinaban diversos métodos (cuadro 15). En el caso de los frutos tiernos, en todos los casos se indicó que se debían coger con la mano y separarlos de la planta.

Cuadro 15. Método de cosecha de los frutos sazones de tacaco.

Método	Número de productores (n=15)
Los recoge del suelo	8 (53)
Lo hala con la mano	8 (53)
Lo toca y cae	5 (33)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada método de cosecha de frutos.

Poscosecha

Con respecto al almacenamiento de los frutos antes de su venta o consumo, un 60% de las personas entrevistadas aseguró que realizaba esta práctica, mientras que un 40% no lo hacía.

En relación con los métodos de tratamiento poscosecha, un 40% de los entrevistados indicó que los guardaba en cajas plásticas o sacos, mientras que otro 27% los guardaba en recipientes plásticos a la sombra (cuadro 16). Solamente un 13% de los agricultores afirmó que lavaba los frutos sazones luego de la cosecha. Por otra parte, los productores indicaron que los frutos tiernos no se lavaban.

Cuadro 16. Método de tratamiento poscosecha de los frutos de tacaco.

Método	Número de productores (n=15)
Lo guarda en cajas plásticas o sacos	6 (40)
Lo guarda en recipientes plásticos a la sombra	4 (27)
Lo lava	2 (13)
Lo guarda en camas cubiertas con hojas de banano secas	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada método de tratamiento poscosecha de frutos.

En cuanto al período de almacenamiento de los frutos, un 27% de los agricultores indicó que los podía guardar por 15 días, si se empacaban en bolsa plástica (cuadro 17); por otra parte, un 26% afirmó que podía almacenar los frutos entre 2 y 4 días, y los demás agricultores mencionaron otros períodos de almacenamiento. Un productor mencionó que podía almacenar los frutos hasta por 30 días; en ese caso, los frutos se debían mantener estrictamente bajo la sombra, y se debían rociar con agua periódicamente. Sin embargo, algunas personas indicaron que no era recomendable almacenar los frutos de tacaco, debido a la deshidratación, lo que provoca que se arruguen.

Cuadro 17. Período de almacenamiento de los frutos de tacaco.

Número de días	Número de productores (n=15)
15 días (en bolsa plástica)	4 (27)
3-4 días	2 (13)
2 días (fruto tierno)	2 (13)
1 día	1 (7)
3-4 días (fruto tierno)	1 (7)
8 días	1 (7)
30 días	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada período de almacenamiento de frutos.

Comercialización

Trece personas (87% del total) afirmaron que empacaban los frutos de tacaco para venderlos, mientras que las otras dos personas (13%) no realizaban esta práctica.

Con respecto al tipo de empaque, el más utilizado (47% de los agricultores) era la bolsa plástica, para 500 g de frutos tiernos (cuadro 18). Un agricultor mencionó que los frutos tiernos se vendían bastante bien en las ferias del agricultor de Alajuela y Heredia.

El 60% de los agricultores indicó que el lugar preferido de venta de tacaco era el CENADA (Centro Nacional de Abastecimiento y Distribución de Alimentos), que corresponde al principal mercado mayorista de Costa Rica [1], seguido de las ferias del agricultor (47% de las personas), y algún intermediario (33%) (cuadro 19). Un productor indicó que los clientes en las ferias del agricultor preferían los tacacos sin espinas, por su sabor y por la facilidad para quitarles la cáscara.

Cuadro 18. Tipo de empaque de los frutos de tacaco para la venta.

Tipo de empaque	Número de productores (n=15)
Bolsa plástica de 500 g (fruto tierno)	7 (47)
Caja plástica	2 (13)
Mallas o sacos de 40 kg	2 (13)
Recipientes plásticos	2 (13)
Bolsa plástica de 500 g o 1 kg	2 (13)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada tipo de empaque de frutos.

Cuadro 19. Lugar de venta del tacaco.

Lugar de venta	Número de productores (n=15)
CENADA	9 (60)
Feria del agricultor	7 (47)
Intermediario	5 (33)
Finca	1 (7)
Hortifrutí	1 (7)
Mercado municipal	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada lugar de venta de frutos.

En relación con el precio de venta del tacaco sazón, se verificó una amplia variabilidad; los precios por kilogramo que más se mencionaron fueron entre 400 y 1.000 colones (13%), entre 500 y 700 colones (13%), y 800 colones (13%); el precio máximo informado fue de 2.000 colones/kg, y el precio mínimo fue de 200 colones/kg (cuadro 20). Una persona mencionó que, si los frutos de tacaco presentaban manchas por enfermedades (“pinta” del fruto), su precio en el mercado era menor.

Entre los años 2001 y 2010, los precios en el CENADA oscilaron entre 275 y 1.080 colones por kilogramo [1]. Por otra parte, en un estudio entre cinco productores de tacaco de la zona de Paraíso, Cartago, publicado en el año 2020, se informó que los precios al por mayor del tacaco sazón oscilaron entre 500 y 800 colones/kg, y los precios de venta al detalle entre 500 y 2.000 colones/kg [30].

Por último, en el caso de los frutos tiernos, los precios por bolsa de 500 g oscilaron entre 200 y 700 colones (cuadro 21).

Cuadro 20. Precio de venta del tacaco sazón.

Precio (colones/kg)	Número de productores (n=15)
400-1.000	2 (13)
500-700	2 (13)
800	2 (13)
200-800	1 (7)
300-1.200	1 (7)
300-1.500	1 (7)
400-1.300	1 (7)
500-1.000	1 (7)
500-1.200	1 (7)
500-2.000	1 (7)
700	1 (7)
1.500-2.000	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada precio.

Cuadro 21. Precio de venta del tacaco tierno.

Precio (colones/bolsa de 500 g)	Número de productores (n=15)
200-300	2 (13)
200-400	2 (13)
350	1 (7)
600-700	1 (7)

Nota: El número entre paréntesis corresponde a la frecuencia relativa (%) para cada precio.

Conclusiones

Se concluye que la producción de tacaco está en manos de pequeños productores, los cuales cuentan con un gran acervo cultural relacionado con la producción de esta hortaliza.

Este trabajo constituye el primer estudio sobre la caracterización del sistema productivo de tacaco en Costa Rica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo. Además, agradecen la colaboración de Manuel Morales, José Araya Sáenz, Douglas Madriz Fonseca, Cristian Castillo Sánchez, Carlos Castillo Solano, Rafael Moya, Gerardo Redondo, David Calderón, Rafael Sandoval, Jader José González Bustos, Jorge Corrales Roldán, Zaida Morales Morales, Juan Miguel Calderón Ramírez, Carlos Madriz, y Edgar Mora Roldán; así como de Karen Muñoz en la recopilación de información.

Referencias

- [1] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Caracterización de frutos de cinco genotipos de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. 30, n° 3, pp. 71-84, 2017.
- [2] A. Brenes, «Situación actual y perspectivas del tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en Costa Rica,» *Boletín Agrario*, vol. 11, n° 39, pp. 1-23, 1992.
- [3] A. Brenes y S. Chaves, «El tacaco en Costa Rica: erosión genética, erosión cultural,» de *X Congreso Agronómico Nacional y de Recursos Naturales*, San José, Costa Rica, 1996.
- [4] R. Lira, «Estudios taxonómicos en el género *Sechium* P. Br. (Cucurbitaceae),» Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 1995.
- [5] J. León, Botánica de los cultivos tropicales, San José, Costa Rica: IICA, 1987.
- [6] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Cuantificación de la variabilidad entre progenies de tacaco (*Sechium tacaco*),» *Revista Pensamiento Actual*, vol. 18, n° 30, pp. 67-77, 2018.
- [7] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Variabilidad morfológica en frutos de una población de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] a través del tiempo,» *Tecnología en Marcha*, vol. 31, n° 4, pp. 15-24, 2018.
- [8] J. Morales, «Morfología general del tacaco, *Sechium tacaco* (Cucurbitaceae),» *Revista de Biología Tropical*, vol. 42, n° 1-2, pp. 59-71, 1994.
- [9] A. Brenes y R. Campos, «Efecto de la posición de la semilla de tacaco (*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey) sobre la germinación,» *Uniciencia*, vol. 9, n° 1, pp. 13-18, 1992.
- [10] J. C. Saborío y A. Brenes, «Variación del porcentaje de germinación de la semilla de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], a lo largo del ciclo productivo de la planta,» de *XI Congreso Agronómico Nacional y de Recursos Naturales*, San José, Costa Rica, 1999.
- [11] J. C. Saborío, «Estudio fenológico del tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], en Santa Lucía, Barva, Heredia,» Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 1998.
- [12] J. C. Saborío, A. Brenes y S. Munguía, «Comportamiento del rendimiento en una población experimental de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], localizada en Barva, Heredia,» de *Memoria XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales*, San José, Costa Rica, 1999.
- [13] J. C. Saborío, A. Brenes y S. Munguía, «Variación de los caracteres morfométricos de frutos y semillas de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], a lo largo del ciclo productivo de la planta,» de *Memoria XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales*, San José, Costa Rica, 1999.
- [14] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Morfometría básica de frutos espinosos de “accesiones” de tacaco (*Sechium tacaco*; Cucurbitaceae),» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 16, p. e5268, 2024.
- [15] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Novedad: Presencia de cuatro y ocho suturas longitudinales completas en frutos de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey],» *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 26, pp. 42-46, 2022.

- [16] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Tacaco (*Sechium tacaco*; Cucurbitaceae): cuantificación de la variabilidad en el número de espinas y suturas del fruto,» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 16, nº e5426, pp. 1-9, 2024.
- [17] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Primer informe sobre heteroblastia en protofilas de tacaco (*Sechium tacaco*),» *Tecnología en Marcha*, vol. 36, nº 1, pp. 33-41, 2023.
- [18] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Primer informe sobre la presencia de dos protofilas por nudo en plántulas de tacaco (*Sechium tacaco*), en Costa Rica,» *Centro Agrícola*, vol. 49, nº 4, pp. 78-81, 2022.
- [19] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Primer informe sobre presencia de yemas cotiledonares en plántulas de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey],» *Tecnología en Marcha*, vol. 36, nº 2, pp. 32-36, 2023.
- [20] M. E. Murillo-Quesada, «Establecimiento in vitro de tacaco *Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey syn. *Frantzia tacaco*,» Escuela de Agronomía, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica, 2019.
- [21] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Efecto de ácido indol butírico sobre la propagación de tacaco (*Sechium tacaco*) mediante acodo aéreo,» *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, nº 1, pp. 94-100, 2024.
- [22] K. M. Muñoz-López, «Propagación asexual de tacaco (*Sechium tacaco*) mediante esquejes,» Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica, 2023.
- [23] J. E. Monge-Pérez, K. M. Muñoz-López y M. Loría-Coto, «Propagación de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] mediante esquejes: efecto del factor genético,» *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 28, pp. 106-117, 2024.
- [24] J. E. Monge-Pérez, K. M. Muñoz-López y M. Loría-Coto, «Efecto de la longitud del esqueje sobre la propagación asexual de tacaco (*Sechium tacaco*; Cucurbitaceae),» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 16, nº e5238, pp. 1-9, 2024.
- [25] K. M. Muñoz-López y J. E. Monge-Pérez, «Efecto de *Trichoderma harzianum* sobre esquejes de tacaco (*Sechium tacaco*),» *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, nº 2, pp. 1-9, 2024.
- [26] K. M. Muñoz-López y J. E. Monge-Pérez, «Propagación de tacaco (*Sechium tacaco*) mediante esquejes: efecto del ácido indol butírico,» *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, nº 2, pp. 1-9, 2024.
- [27] M. d. M. Cerdas-Araya y J. Castro-Chinchilla, «Caracterización poscosecha de frutos de tacaco (*Sechium tacaco*) en Cartago, Costa Rica,» *Agronomía Mesoamericana*, vol. 28, nº 1, pp. 141-148, 2017.
- [28] Instituto Nacional de Estadística y Censos, VI Censo Nacional Agropecuario: resultados generales, San José, Costa Rica: INEC, 2015.
- [29] E. Garita y M. Murillo, «Capacidades productivas de los productores de chayote en Paraíso de Cartago, Costa Rica,» Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2007.
- [30] E. Aguilar, «Etnobotánica del tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en cinco fincas productoras y bosques en El Yas y La Flor, Santiago, Paraíso, Cartago, Costa Rica,» Universidad Estatal a Distancia, Sabanilla, Montes de Oca, San José, Costa Rica, 2020.
- [31] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «Caracterización del área de influencia, Región de Desarrollo Central Oriental,» Región Central Oriental, Cartago, Costa Rica, 2020.
- [32] R. G. Cervantes-Gámez, O. Peñuelas-Rubio, N. Araujo-Benard, R. A. Fierro-Coronado, D. Trejo-Aguilar, I. E. Maldonado-Mendoza y J. D. Cordero-Ramírez, «Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares asociados a plantas voluntarias de maíz en suelos de transición: ecosistema natural - uso agrícola,» *Scientia Fungorum*, vol. 51, p. e1330, 2021.
- [33] R. I. Mera, J. Artieda, M. Muñoz y K. Romero, «Influencia lunar en cultivos, animales y ser humano,» *Uniandes Episteme: Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 4, nº 1, pp. 37-47, 2017.
- [34] M. Granados-Montero, J. Avelino, F. Arauz-Cavallini, S. Castro-Tanzi y N. Ureña, «Hojarasca e inóculo de *Mycena citricolor* sobre la epidemia de ojo de gallo,» *Agronomía Mesoamericana*, vol. 31, nº 1, pp. 77-94, 2020.
- [35] J. Peñaloza, A. K. Reyes, A. González, D. J. Pérez y D. M. Sangerman-Jarquín, «Fertilización orgánica con tres niveles de gallinaza en cuatro cultivares de papa,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 10, nº 5, pp. 1139-1149, 2019.
- [36] W. Watson-Guido, A. Fuentes-Alfaro y J. Madrigal-Rueda, «Aislamiento e identificación de *Ascochyta phasaeolorum* proveniente de un cultivo de *Sechium edule* en Costa Rica,» *Tecnología en Marcha*, vol. Edición Especial Biocontrol, pp. 15-21, 2016.

- [37] J. C. Saborío, G. Rivera y A. Esquivel, «Identificación de algunas plagas presentes en el cultivo de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], en Santa Lucía, Barva, Heredia,» de *XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales*, San José, Costa Rica, 1999.
- [38] W. Villalobos, L. Moreira, K. D. Bottner, M. Lee, G. Saborío, A. Fernández, L. Garita y C. Rivera, «Estado de la investigación sobre el bejuquillo del chayote (*Sechium edule* SW.) en Costa Rica,» de *V Congreso Nacional de Fitopatología*, San José, Costa Rica, 2003.
- [39] W. Villalobos, L. Moreira, C. Rivera, K. D. Bottner y I. M. Lee, «First report of an aster yellows subgroup 16Srl-B phytoplasma infecting chayote in Costa Rica,» *Plant Disease*, vol. 86, n° 3, p. 330, 2002.
- [40] Ministerio de Agricultura y Ganadería, «Proyecto de investigación y transferencia de tecnología para el manejo del blanqueamiento del cultivo de chayote (*Sechium edule*),» Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, San José, Costa Rica, 2012.
- [41] J. C. Saborío y A. Brenes, «Eventos fenológicos del tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey],» de *XI Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales*, San José, Costa Rica, 1999.

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.

Optimización de protocolo de micropropagación de variedades de *Fragaria x ananassa*, cultivadas en la zona norte de Cartago

Optimization of the micropropagation protocol for *Fragaria x ananassa* varieties cultivated in the northern region of Cartago

Alison Salas-Campos¹, Jason Perez-Chavez², Giovanni Garro-Monge³

Fecha de recepción: 30 de enero, 2025

Fecha de aprobación: 26 de mayo, 2025

Salas-Campos, A; Perez-Chavez, J; Garro-Monge, G. Optimización de protocolo de micropropagación de variedades de *Fragaria x ananassa*, cultivadas en la zona norte de Cartago. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 22-33.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7822>

1 Centro de Investigación en Biotecnología Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Cartago, Costa Rica.

 alisonsalas@estudiantec.cr

2 Centro de Investigación en Biotecnología Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Cartago, Costa Rica.

 jasperez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-8267-4978>

3 Centro de Investigación en Biotecnología Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Cartago, Costa Rica.

 ggarro@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-7578-1938>



Palabras clave

Desinfección; embriogénesis somática; reguladores; explante; cultivo *in vitro*.

Resumen

La fresa es uno de los cultivos más importantes tanto a nivel económico como nutricional. Sin embargo, enfrenta diversos desafíos debido a plagas como gusanos jobotos, cortadores y ácaros, que afectan su rendimiento y calidad. El método convencional de propagación mediante estolones presenta altos costos laborales y el riesgo de transmisión de enfermedades, lo que hace que la introducción de achenos *in vitro* sea una alternativa crucial. Por ello, se evalúan diferentes tratamientos, como la exposición a radiación, incubación a bajas temperaturas, variaciones en las condiciones ambientales y distintas dosis de hipoclorito de sodio con tiempos de exposición variados. La micropropagación *in vitro* emerge como una solución para la producción de clones libres de patógenos y la mejora de características genéticas, procesos que requieren el uso de reguladores de crecimiento y aminoácidos, cuya eficacia depende de factores como la dosis, el tipo de explante y las condiciones ambientales. Para optimizar estos parámetros, se probaron varios explantes, observándose que la hoja inferior y la yema son los más eficientes para inducir la formación de callo debido a su morfología y mayor densidad celular. En cuanto a los medios de cultivo, el Medio 3 destacó por ofrecer la mejor sobrevivencia de explantes, con un 26%, aunque no se observaron diferencias significativas entre los medios. En la etapa de proliferación, el Medio 3 mostró el mejor rendimiento al promover la regeneración y la formación de brotes, los cuales presentaron estructuras totipotentes y fibrosas.

Keywords

Desinfection; somatic embryogenesis; regulators; explant; *in vitro* culture.

Abstract

Strawberry is one of the most important crops both economically and nutritionally. However, it faces several challenges due to pests such as rootworms, cutworms, and mites, which affect its yield and quality. The conventional propagation method using runners involves high labor costs and the risk of disease transmission, making the *in vitro* introduction of achenes a crucial alternative. Therefore, different treatments are evaluated, such as exposure to radiation, incubation at low temperatures, variations in environmental conditions, and different sodium hypochlorite doses with varied exposure times. *In vitro* micropropagation emerges as a solution for producing pathogen-free clones and improving genetic traits, processes that require the use of growth regulators and amino acids, whose effectiveness depends on factors such as dose, explant type, and environmental conditions. To optimize these parameters, several explants were tested, with the lower leaf and the bud proving to be the most efficient for callus induction due to their morphology and higher cell density. Regarding culture media, Medium 3 stood out for offering the best explant survival rate, at 26%, although no significant differences were observed between the media. In the proliferation stage, Medium 3 showed the best performance by promoting regeneration and the formation of shoots, which exhibited totipotent and fibrous structures.

Introducción

La fresa es uno de los cultivos más populares y valorados a nivel mundial, gracias a su alto contenido de vitamina C; así como su abundancia de antioxidantes como antocianinas, catequinas, entre otros; y minerales esenciales [1]. Estos compuestos han demostrado tener un impacto positivo en la salud, destacándose por su potencial en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares, la mejora de la salud visual y su efecto contra el cáncer, la diabetes y la obesidad [2]. Esto convierte a la fresa en un producto altamente demandado tanto para consumo fresco como para la industria alimentaria y de saborizantes.

Según el último reporte registrado, en Costa Rica durante el 2014 se registraron 342 fincas dedicadas a su producción, principalmente ubicadas en la provincia de Cartago [3]. Para 2022, el área cosechada alcanzó aproximadamente 163 hectáreas, con un rendimiento promedio de 30,531.4 kg/ha y una producción total de 4,972.38 toneladas [4]. Sin embargo, este cultivo enfrenta importantes desafíos debido a su alta susceptibilidad a plagas y enfermedades que afectan la calidad y el rendimiento del fruto. Entre las plagas más comunes se encuentran los gusanos jobotos (*Phyllophaga spp.*), que dañan raíces y tallos, induciendo marchitamiento y caída de hojas; los cortadores (*Prodenia sp.* y *Spodoptera sp.*), que atacan durante las primeras etapas de crecimiento y la cosecha; y los ácaros como la araña roja (*Tetranychus urticae*) y el ácaro de la fresa (*Steneotarsonemus pallidus*), que ralentizan el desarrollo de la planta, afectando principalmente las hojas maduras [5]. Actualmente, la reproducción de la fresa se realiza principalmente a través de estolones, un método que requiere una alta inversión en mano de obra y puede servir como vector de enfermedades [5]-[6].

En este contexto, las técnicas *in vitro* se posicionan como una alternativa prometedora para la micropropagación masiva de plantas de fresa, ofreciendo soluciones innovadoras frente a los métodos tradicionales. Entre estas, destaca la embriogénesis somática indirecta, un proceso que involucra la formación inicial de un callo, el cual actúa como un precursor para el desarrollo embrionario. A partir de callo, es posible inducir tanto la proliferación como la regeneración de brotes, etapas esenciales en la obtención de plantas completas [7]. Estas técnicas no solo garantizan la producción de clones libres de patógenos, sino que también contribuyen significativamente al mejoramiento genético. Esto permite optimizar aspectos clave, como características morfológicas y productivas, para satisfacer las demandas de las variedades comerciales y mejorar la competitividad del cultivo [2]-[5].

El uso de reguladores de crecimiento y aminoácidos resulta esencial en dichos procesos, ya que su efectividad depende de la dosis empleada, el tipo de explante y las condiciones ambientales, lo que resalta la importancia de estandarizar protocolos específicos [7]-[8]. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo aplicar pruebas *in vitro* a distintos explantes bajo diversas concentraciones de reguladores de crecimiento, con el fin de identificar las dosis óptimas para maximizar la eficiencia en la propagación y regeneración de plantas de fresa.

Materiales y métodos

Se realizaron los experimentos en el Centro de Investigación de Biotecnología (CIB) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ubicado en Cartago, Costa Rica durante 2023 al 2024.

Desinfección de aquenios

Los aquenios fueron irradiados y sometidos a condiciones de humedad y seco, ambos incubados a 4 °C durante una semana [9]. Posteriormente, los aquenios se dividieron en cinco grupos de 100 unidades cada uno, y cada grupo fue expuesto a distintas dosis de irradiación: 0, 40, 80, 120 y 160 Gy. Tras la irradiación, cada grupo se subdividió en cuatro subgrupos de

25 aquenios. Los explantes fueron lavados con una solución al 20% de jabón y dos gotas de Tween 20 durante 15 minutos, seguidos de tres enjuagues con agua destilada estéril, cada uno de dos minutos. Luego, se aplicó etanol al 70% durante 60 segundos. Finalmente, se utilizaron dos concentraciones de hipoclorito de sodio al 3% y al 4%, aplicadas durante 10 y 20 minutos, respectivamente [9], [10].

Introducción de callogénesis

Se utilizaron hojas, pecíolos y yemas como explantes de *Fragaria x ananassa*, los cuales fueron previamente introducidos en laboratorio y obtenidos de productores de la zona de Cartago. Para el experimento, se emplearon tres medios de cultivo con composiciones específicas. El Medio 1 contenía 0,5 mg/L Thidiazuron (TDZ), 1 mg/L Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y 0,5 mg/L 6-bencilaminopurina (BAP). El Medio 2 estaba compuesto por 1 mg/L TDZ y 2 mg/L 2,4-D. Finalmente, el Medio 3 incluía 0,5 mg/L TDZ, 1 mg/L 2,4-D, prolina (100 mg/L) y caseína hidrolizada (100 mg/L) [2], [7], [12]. Todos los explantes fueron incubados a 21 ± 2 °C en condiciones de oscuridad.

Inducción de proliferación

Los explantes obtenidos previamente en la etapa de callogénesis fueron distribuidos entre cinco medios de proliferación, manteniendo siempre su posición original. Cada medio contenía 100 mg/L de prolina y 100 mg/L de caseína hidrolizada, combinados con diferentes concentraciones de reguladores hormonales. El Medio 1 estuvo constituido por 0,2 mg/L de 2,4-D, 1,0 mg/L de TDZ y 0,1 mg/L de Ácido Giberélico (AG α) [13]. El Medio 2 se conformó por 1,5 mg/L de TDZ y 0,5 mg/L de BAP [9]. El Medio 3 incluyó 1 mg/L de TDZ y 0,2 mg/L de ácido indol-3-butírico (AIB) [14]. El Medio 4 consistió en 1,0 mg/L de AG α , 0,5 mg/L de BAP y 0,3 mg/L de IBA [15]. Por último, el Medio 5 actuó como control y no contenía reguladores hormonales. El material vegetal fue incubado a 21 ± 2 °C en condiciones de oscuridad y se subcultivaron cada dos a tres semanas.

Resultados y discusión

Desinfección de aquenios

Durante el proceso de desinfección de aquenios, únicamente las semillas incubadas a 4 °C en seco y tratadas con 4% de hipoclorito de sodio por 20 minutos lograron germinar (Figura 1). El pretratamiento con altas temperaturas durante un periodo de hasta cinco semanas actúa como un estímulo vernalizante, acelerando el proceso de germinación, al inducir cambios metabólicos y estructurales que preparan al embrión para germinar bajo condiciones favorables [16]. Dicho efecto se atribuye a la ruptura de la dormancia de las semillas, mediante alteraciones en la actividad hormonal, como la reducción del ácido abscísico y el incremento de giberelinas, lo que favorece al proceso de introducción *in vitro* de aquenios [16].

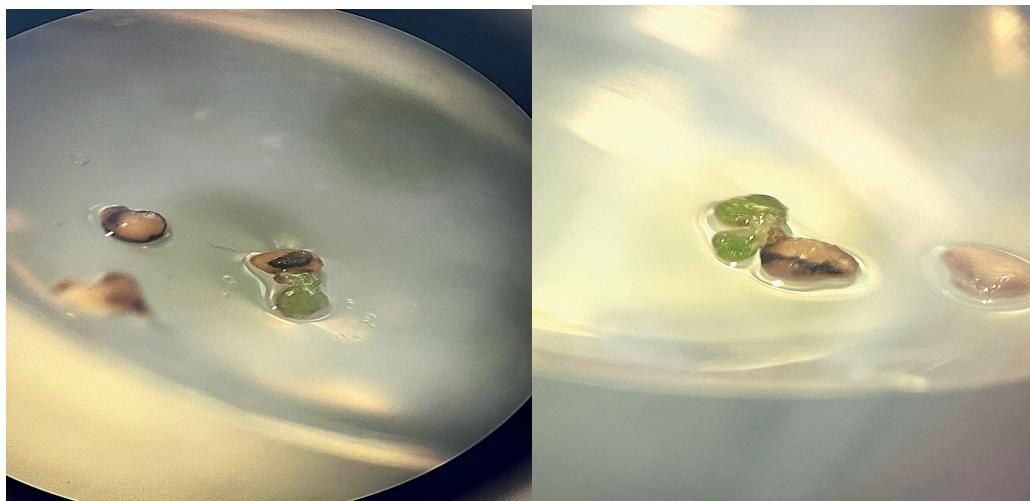


Figura 1. Resultados de introducción de aquenios de *Fragaria x ananassa*. (A) 40 Gy a 4% por 20 minutos incubado en seco y (B) 120 Gy 4% por 20 minutos incubado en seco.

De igual forma, la aplicación de radiación como los rayos Grays en la introducción de material vegetal ofrece beneficios y limitaciones. A dosis bajas, esta radiación puede estimular el crecimiento de las plantas, mejorando la tasa de germinación, así como el desarrollo de brotes y raíces nuevas [17]. Contrario a lo anterior, en dosis superiores a 250 Gy se ha evidenciado alteraciones significativas en los tejidos meristemáticos y una reducción en la actividad de enzimas críticas como α -amilasas y lipasas, esenciales para la movilización de reservas energéticas durante la germinación [17]. Por consiguiente, los tratamientos vistos en la Figura 1 resultan favorables en el proceso de germinación de aquenios.

Introducción de callogénesis

En el desarrollo de la embriogénesis somática de *Fragaria x ananassa*, los explantes hoja abajo y yema destacan por su mayor porcentaje de formación de callo en comparación con otros explantes, lo que sugiere un mejor rendimiento en los medios evaluados. Por otro lado, los explantes hoja arriba y pecíolo corto presentan una menor variabilidad en los porcentajes de formación de callo entre los diferentes medios utilizados, indicando una mayor consistencia en su respuesta. En contraste, el explante pecíolo largo muestra una marcada variabilidad entre medios, con un porcentaje alto en el Medio 1 para un 100% y significativamente menor en el Medio 2 con 12.5% y el Medio 3 con 37.5% (cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentajes de formación de callo por tratamiento según la posición del explante.

Tratamiento	Medio 1	Medio 2	Medio 3
Hoja arriba	66.6	50	50
Hoja abajo	66.6	66.6	33.3
Pecíolo largo	100	12.5	37.5
Pecíolo corto	50	50	12.5
Yema	75	50	25

En la Figura 2, se observa que el explante Hoja arriba presenta una concentración media más baja en comparación con Hoja abajo, acompañada de una menor variabilidad, lo que refleja resultados más consistentes. Por otro lado, el explante Pecíolo corto muestra una concentración media intermedia con una baja variabilidad, lo cual sugiere resultados homogéneos entre los tratamientos evaluados. En contraste, Pecíolo largo exhibe un rango intercuartílico amplio y valores extremos alejados, lo que evidencia una alta variabilidad en la obtención de callo. Finalmente, el explante Yema presenta una concentración media intermedia con una variabilidad moderada, posicionándose como un tratamiento más equilibrado en términos de eficacia y consistencia.

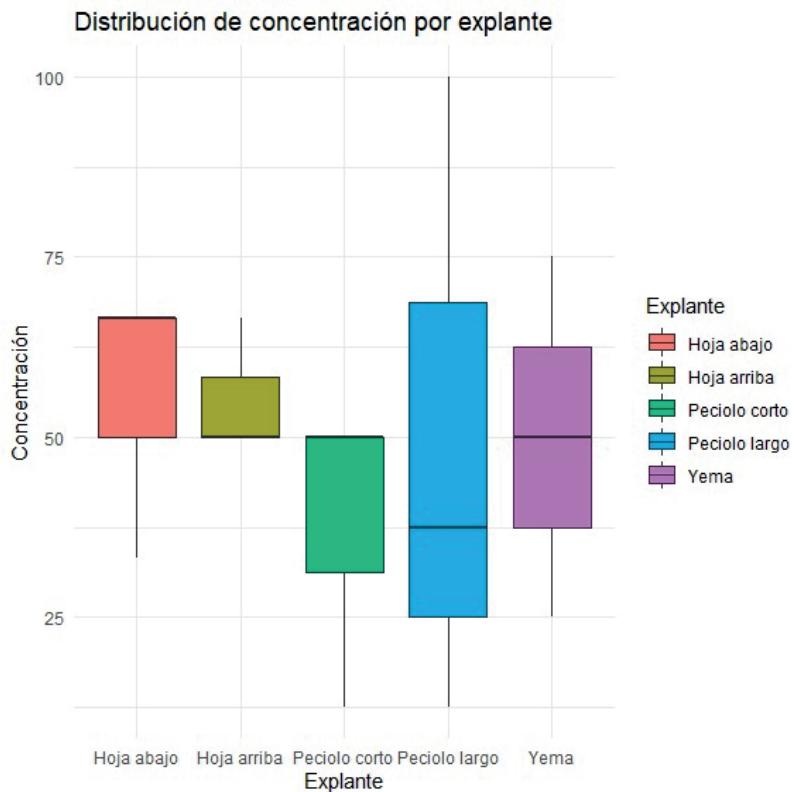


Figura 2. Comparación de los resultados obtenidos de explantes de *Fragaria x ananassa* en la etapa de callogénesis, representados mediante un gráfico de cajas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el tipo de explante empleado juega un papel crucial en la eficiencia y la calidad del proceso de callogénesis. Este es el caso de las hojas, ya que estudios previos han demostrado que láminas basales y hojas enteras son explantes altamente eficaces, alcanzando tasas de inducción de callos de hasta un 100% en un periodo de dos semanas [18], debido a la superficie de contacto con el medio de cultivo, que favorece una absorción más eficiente de nutriente, y la mayor densidad de células pluripotentes, las cuales pueden ser estimuladas en vías embriogénicas, dando como resultado la formación de callos verdes compactos, ideales para aplicaciones en regeneración y micropropagación [11], [13], [19], [20].

Al utilizar yema, este se ha reportado como una alternativa prometedora en la obtención de callo, en conjunto con el uso de AIB, con una respuesta de 58,5% [18]-[21]. Mientras, al usar pecíolos como explantes, se observa una respuesta más limitada en la inducción de callogénesis, lo que puede estar asociada a la estructura simple de estos y a su menor densidad de celular, lo cual impacta negativamente en su capacidad regenerativa [18]-[19].

Tras analizar los medios utilizados (cuadro 2), se observa que la formación de callo es consistente en todos ellos, alcanzando un 100%. Sin embargo, al evaluar la sobrevivencia de los explantes, el Medio 3 presenta los mejores resultados, con un 26% de sobrevivencia. En contraste, el Medio 2 muestra el mayor porcentaje de descarte de explantes, con un 82%, lo que sugiere menos efectividad para el desarrollo de las plantas en comparación con los otros medios estudiados.

Cuadro 2. Porcentaje de formación de callo, sobrevivencia y descarte de explantes de *Fragaria x ananassa* según el medio utilizado.

Dosis	Callo (%)	Sobrevivencia (%)	Descarte (%)
Medio 1	100	22	78
Medio 2	100	18	82
Medio 3	100	26	74

Por otro lado, los valores presentados en el cuadro 2 no evidencian diferencias significativas entre los medios evaluados, esto se confirma mediante los resultados del análisis de varianza (ANOVA), que arrojó un valor de $p = 0.8826$ mayor al preestablecido, por lo que no se rechaza la hipótesis nula confirmando que no existen diferencias significativas entre los tratamientos analizados. Por ello, se elaboró un gráfico de intervalos de confianza (Figura 3), el cual muestra que las diferencias de medias entre los tratamientos se ubican dentro de los intervalos de confianza y próximas al valor cero.

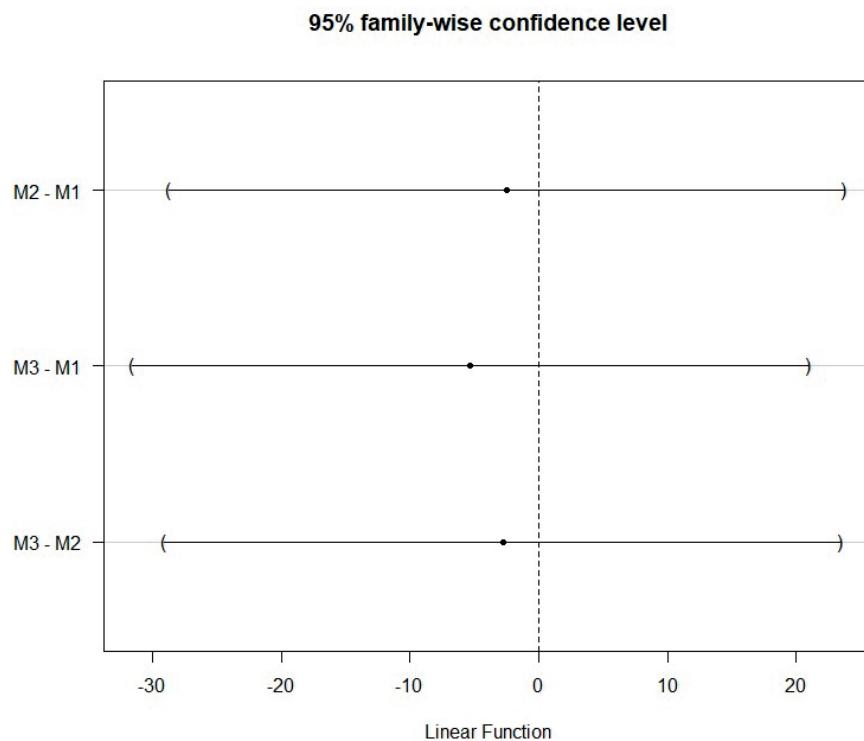


Figura 3. Gráfico de intervalos de confianza que muestra la comparación entre los medios de callogénesis de *Fragaria x ananassa*.

La combinación de auxinas y citoquininas es ampliamente reconocida por su capacidad para regular procesos fundamentales, como la división y diferenciación celular, durante la callogénesis [2]. En particular, las auxinas, como el 2,4-D, desempeñan un papel esencial en la iniciación de la formación de callos y embriones somáticos, mostrando resultados óptimos a concentraciones de hasta 2 mg/L, donde fomentan la proliferación celular sin inducir efectos tóxicos [22]. Las citoquininas, como el TDZ y el BAP, complementan esta acción al inducir la organogénesis y favorecer el desarrollo de estructuras como brotes y raíces. Además, la combinación de dos citoquininas, como el TDZ y el BAP, potencia su eficacia al equilibrar los procesos de división y diferenciación celular [18].

El Medio 1, que incorpora una combinación de 2,4-D, TDZ y BAP, ha demostrado ser altamente eficaz, logrando una producción de brotes de hasta el 90% y un desarrollo significativo del tamaño del callo tras cuatro semanas de cultivo [2]-[18]. Asimismo, cabe destacar que los medios que incluyen TDZ son más efectivos para el desarrollo de callos bajo condiciones de oscuridad [2]. En contraste, los Medios 2 y 3, que consisten únicamente en 2,4-D y TDZ, muestran mejores resultados en explantes de hoja y pecíolo [2]-[18].

Por otro lado, el Medio 3 combina hormonas y aminoácidos, lo que se asocia con una alta tasa de formación de callos de hasta un 70%, facilitando el desarrollo de estructuras globulares y torpedo [22]. Entre los aminoácidos estudiados, la prolina destaca por su capacidad para actuar como un mecanismo de defensa y promover el desarrollo celular, siendo más efectiva que otros aminoácidos como la alanina y la glutamina. No obstante, su efecto depende de la concentración utilizada: mientras que dosis moderadas (hasta 100 mg/L) favorecen el desarrollo embrionario, dosis más altas pueden inhibir este proceso [7]-[22].

Inducción de proliferación

Durante la etapa de proliferación (Figura 4) se obtuvo un 100% de callogénesis de *F. x ananassa* en los cinco medios utilizados. En cuanto a la oxidación, se observó únicamente en los Medios 3 y 4, con valores del 76% y 24%, respectivamente. En cuanto a la proliferación, esta dinámica se mantuvo con un 44% para el Medio 3 y un 12% para el Medio 4. No obstante, la regeneración se limitó al 24% de los explantes del Medio 3, lo que impactó significativamente en la formación de brotes, reduciendo su valor a un 16% en este mismo medio. Como se puede ver en la Figura 5, los brotes obtenidos cuentan con estructuras totipotentes, con explantes fibrosos.

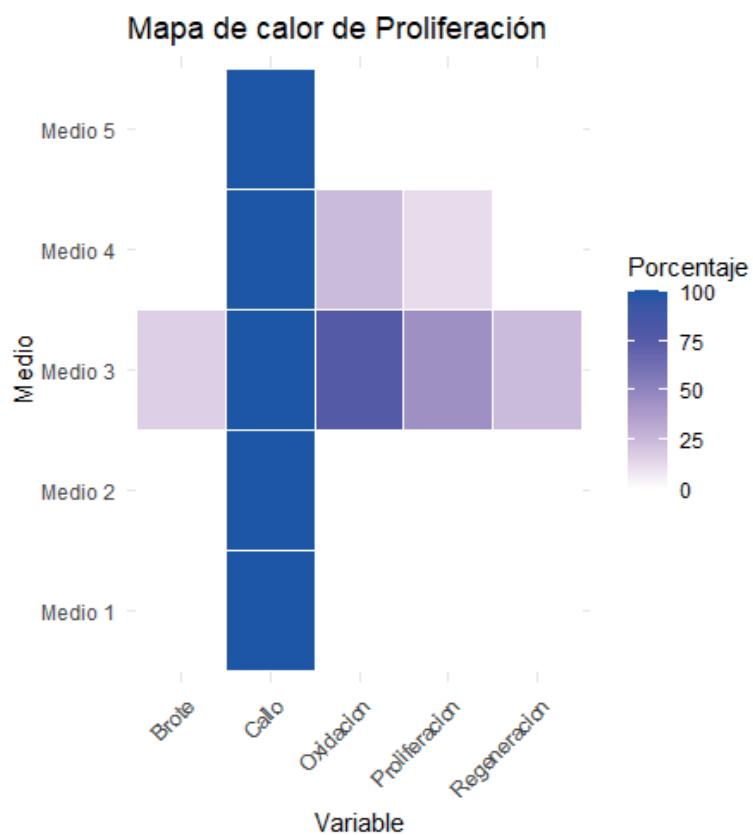


Figura 4. Porcentaje de los resultados obtenidos en la etapa de proliferación de *Fragaria x ananassa* según las variables evaluadas (brote, callo, oxidación, proliferación y regeneración).

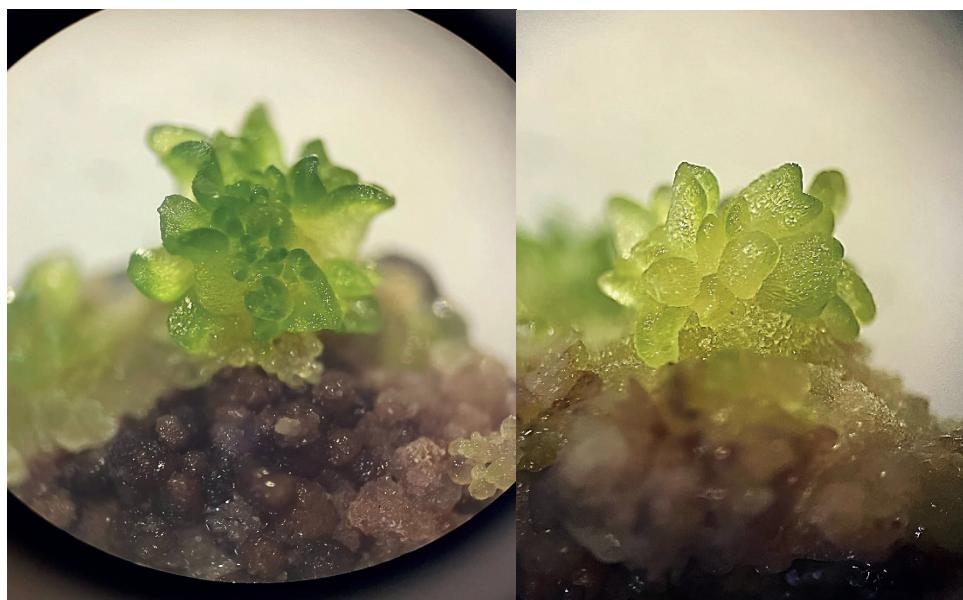


Figura 5. Formación de brote en hoja de *Fragaria x ananassa* tras 100 días de inducción de proliferación.

Con base en los resultados obtenidos, el Medio 3 destacó por su desempeño favorable en todas las variables evaluadas (Figura 4), el cual es capaz de inducir la diferenciación de brotes mediante la organogénesis (Figura 5). Se constituye de una mezcla de IBA y TDZ, mostró una

eficacia superior para la inducción de brotes y la regeneración, en concordancia con estudios previos que reportan índices más altos de proliferación al combinar estos dos reguladores en comparación con tratamientos basados en IBA y BAP [2]. Aunque el uso exclusivo de IBA no genera efectos significativos en la regeneración, su combinación con TDZ crea un equilibrio óptimo entre auxinas y citoquininas, lo que potencia la división y diferenciación celular necesarias para estos procesos [14]-[23].

Por otro lado, el Medio 4 indujo la proliferación en seis explantes (Figura 4), este medio se compone por AIB, AG3 y BAP, mostró resultados positivos, especialmente debido a la incorporación de AG3 en bajas concentraciones, lo cual favorece la formación de brotes más vigorosos y de mayor tamaño [13]-[24]. Además, el uso de BAP en dosis inferiores a 0.5 mg/L demostró ser particularmente eficiente para la proliferación celular y la formación de brotes, reforzando su papel como una citoquinina clave en protocolos de regeneración [2]-[15].

Conclusiones

En la introducción *in vitro* de aquenios, únicamente dos explantes lograron germinar, lo que permite deducir que el pretratamiento en seco y la exposición a una solución de hipoclorito de sodio al 4% durante 20 minutos resultan ser los métodos más efectivos hasta el momento. No obstante, se recomienda ampliar el tiempo de evaluación del protocolo, así como expandir el tiempo de incubación.

Al realizar el análisis estadístico de la etapa de callogénesis, se concluyó que los explantes con mayor eficacia fueron hoja abajo, pecíolo y yema, debido a que proporcionaron datos más consistentes. Aunque los medios empleados no presentaron diferencias significativas entre sí, investigaciones reportan medios de callogénesis con IBA que muestran resultados efectivos, por lo que se recomienda incluir un cuarto medio con tal de evaluar si su incorporación mejora los resultados observados en callogénesis.

Durante la etapa de proliferación, el Medio 3 dio resultados positivos al inducir la formación de brotes. En contraste, el Medio 4 favoreció la proliferación de explantes, pero no logró inducir brotación, lo que resalta la necesidad de ajustar las concentraciones de reguladores de crecimiento, de manera que se promueva tanto la proliferación como la brotación de manera más eficiente, así como realizar una comparación más exhaustiva entre los medios para optimizar las condiciones de cultivo.

Referencias

- [1] L. R. da Silva *et al.*, «Strawberries in a warming world: examining the ecological niche of *Fragaria ananassa* Duch – Across different climate scenarios», *Journal of Berry Research*, vol. 14, n.º 3, pp. 193-208, ene. 2024, doi: [10.3233/JBR-240012](https://doi.org/10.3233/JBR-240012).
- [2] H.-H. Chung y H.-Y. Ouyang, «Use of Thidiazuron for High-Frequency Callus Induction and Organogenesis of Wild Strawberry (*Fragaria vesca*)», *Plants*, vol. 10, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2020, doi: [10.3390/plants10010067](https://doi.org/10.3390/plants10010067).
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Censos, “Cultivos agrícolas, forestales y ornamentales” en VI Censo Nacional Agropecuario, no1 . tomo 2. San José, Costa Rica: INEC, 2015.
- [4] Organización para la Alimentación y la Agricultura, “Cultivos y productos de ganadería”, FAOSTAT, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (Consultado 20 dic., 2024).
- [5] E. Cadet, “Control de plagas de fresa orgánica”, Instituto Nacional de Aprendizaje, <https://alternativasapla-guicidas.cr/wp-content/uploads/2024/06/Manual-FRESA-CNEAO.pdf> (Consultado 25 nov., 2024).
- [6] R. Puscan, E. R. V. Castro, y C. E. M. Chanamé, «Combined effect of cytokinins on the *in vitro* propagation of three strawberry cultivars», *Rev. Caatinga*, vol. 37, pp. 1-10, sept., 2024. Consultado: 30 nov. 2024. [En línea]. Disponible: doi: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3712180rc>.

- [7] M. Gerdakaneh, A.-A. Mozafari, A. Sioseh-Mardah, y B. Sarabi, «Effects of different amino acids on somatic embryogenesis of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.)», *Acta Physiologiae Plantarum*, vol. 33, n.º 5, Art. n.º 5, feb. 2011, doi: [10.1007/s11738-011-0725-9](https://doi.org/10.1007/s11738-011-0725-9).
- [8] M. Gerdakaneh y A. A. Mozaffari, «Plant Regeneration via Direct Somatic Embryogenesis in Three Strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) Cultivars», *Agrotechniques in Industrial Crops*, sep. 2021, doi: [10.22126/atic.2021.6936.1022](https://doi.org/10.22126/atic.2021.6936.1022).
- [9] W. Q. Pang, S. T. Tan, M. F. Mad' Atari, I. C. K. Yoong, y S. Subramaniam, «Establishment of an efficient micropropagation protocol for Cameron Highlands White Strawberry (*Fragaria x ananassa*) using a light emitting diode (LED) system», *South African Journal of Botany*, vol. 157, pp. 189-200, jun. 2023, doi: [10.1016/j.sajb.2023.03.061](https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.03.061).
- [10] A. M. Khalifa, E. Abd-ElShafy, R. Abu-Khudir, y R. M. Gaafar, «Influence of gamma radiation and phenylalanine on secondary metabolites in callus cultures of milk thistle (*Silybum marianum* L.)», *J Genet Eng Biotechnol*, vol. 20, p. 166, dic. 2022, doi: [10.1186/s43141-022-00424-2](https://doi.org/10.1186/s43141-022-00424-2).
- [11] S. Yeasmin *et al.*, «In vitro Regeneration of Strawberry Plant from Leaf Explants via Callus Induction», *Plant Tissue Culture and Biotechnology*, vol. 32, n.º 1, Art. n.º 1, jun. 2022, doi: [10.3329/ptcb.v32i1.60473](https://doi.org/10.3329/ptcb.v32i1.60473).
- [12] A. Kessel Domini, «Mejora genética de la fresa (*Fragaria ananassa* Duch.), a través de métodos biotecnológicos», Accedido: 4 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362012000300005&script=sci_arttext&tlang=en
- [13] P. Lohasupthawee y P. Chomboon, «Mass Propagation System of Strawberry (*Fragaria x ananassa*) Microshoots by Liquid Shake Culture», *Curr. Appl. Sci. Technol.*, may 2021, doi: [10.55003/cast.2022.01.22.008](https://doi.org/10.55003/cast.2022.01.22.008).
- [14] B. C. Sarker, D. D. Archbold, R. L. Geneve, y S. T. Kester, «Rapid In Vitro Multiplication of Non-Runnning *Fragaria vesca* Genotypes from Seedling Shoot Axillary Bud Explants», *Horticulturae*, vol. 6, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2020, doi: [10.3390/horticulturae6030051](https://doi.org/10.3390/horticulturae6030051).
- [15] A. Thakur, A. K. Nath, y V. Sharma, «Genetic Homogeneity Analysis in Tissue Culture Raised *Fragaria ananassa* Duch. Revealed Through PCR Based Molecular Markers», *Applied Fruit Science*, vol. 66, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2023, doi: [10.1007/s10341-023-00995-5](https://doi.org/10.1007/s10341-023-00995-5).
- [16] Y. Zhang, «Investigation of methylome, transcriptome and phenotypic changes induced by temperature during asexual and sexual reproduction in the woodland strawberry (*Fragaria vesca*)», Doctoral thesis, 2022. Accedido: 11 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.duo.uio.no/handle/10852/98372>
- [17] A. Atteh y A. Adeyeye, «Effect of Low Gamma Irradiation on the Germination and Morphological Characteristics of Broad Beans (*Vicia faba* L.), Mung Beans (*Vigna radiata* L.), and Peas (*Pisum sativum* L.) Seedlings», *Natural Resources*, vol. 13, n.º 5, Art. n.º 5, jun. 2022, doi: [10.4236/nr.2022.135008](https://doi.org/10.4236/nr.2022.135008).
- [18] F. Akter *et al.*, «An Efficient Agrobacterium-Mediated Genetic Transformation System for Gene Editing in Strawberry (*Fragaria x ananassa*)», *Plants*, vol. 13, n.º 5, Art. n.º 5, feb. 2024, doi: [10.3390/plants13050563](https://doi.org/10.3390/plants13050563).
- [19] E. Mukherjee y S. Gantait, «Strawberry biotechnology: A review on progress over past 10 years», *Scientia Horticulturae*, vol. 338, p. 113618, dic. 2024, doi: [10.1016/j.scienta.2024.113618](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113618).
- [20] M. Zhang, A. Wang, M. Qin, X. Qin, S. Yang, S. Su, Y. Sun, and L. Zhang, «Direct and Indirect Somatic Embryogenesis Induction in *Camellia oleifera* Abel», *Front. Plant Sci.*, vol. 12, p. 644389, 2021, doi: [10.3389/fpls.2021.644389](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.644389).
- [21] D. Mc-Caughey-Espinoza, G. Ayala-Astorga, C. García-Baldenegro, N. Buitimea-Cantúa, G. Buitimea-Cantúa, y A. Ochoa-Meza, «Germinación in vitro e inducción de callo y raíz en *Bursera laxiflora* S. Watson», *Abanico Agroforestal*, vol. 2, n.º 0, Art. n.º 0, 2020.
- [22] M. K. Biswas, R. Islam, y M. Hossain, «Somatic embryogenesis in strawberry (*Fragaria* sp.) through callus culture», *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 90, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2007, doi: [10.1007/s11240-007-9247-y](https://doi.org/10.1007/s11240-007-9247-y).
- [23] A. M. Husaini, J. A. Mercado, J. A. Teixeira, y J. G. Schaart, «Review of Factors Affecting Organogenesis, Somatic Embryogenesis and Agrobacterium tumefaciens Mediated Transformation of Strawberry», en *Genes, Genomes and Genomics*, A. M. Husaini y J. A. Mercado, Eds. Kita gun: Japón; Glob. Sci. Bk., 2011, cap. 1, pp. 1-11. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Amjad-Husaini/publication/283796600_Genomics_Transgenics_Molecular_Breeding_and_Biotechnology_of_Strawberry/links/5647c50708ae54697fbbf8e6/Genomics-Transgenics-Molecular-Breeding-and-Biotechnology-of-Strawberry.pdf#page=9

[24] D. B. Shokaeva, N. V. Solovykh, y D. Skovorodnikov, "In Vitro Selection and Strawberry Plant Regeneration for Developing Resistance to *Botrytis cinerea* Pers., *Phytophthora cactorum* Leb. et Cohn (Schroet) and Salinity Stress", en *Genes, Genomes and Genomics*, A. M. Husaini y J. A. Mercado, Eds. Kita gun: Japón; Glob. Sci. Bk., 2011, cap. 13, pp. 115-125. [En línea]. Disponible: https://www.academia.edu/24912764/In_Vitro_Selection_and_Strawberry_Plant_Regeneration_for_Developing_Resistance_to_Botrytis_cinerea_Pers_Physophthora_cactorum_Leb_et_Cohn_Schroet_and_Salinity_Stress?auto=download

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.

La mosca barrenadora (*Cochliomyia hominivorax*) y su reaparición reciente en Costa Rica: una actualización del tema

The New World Screwworm (*Cochliomyia hominivorax*) and Recent Reappearance in Costa Rica: an update

Jose Adrián Alpízar-Ramírez¹, Melody Dianne Campos-Pérez²,
Michael Damián Meléndez-Álvarez³, Kendall Mauricio Ramírez-Zuñiga⁴

Fecha de recepción: 18 de marzo, 2025

Fecha de aprobación: 7 de junio, 2025

Alpízar-Ramírez, J.A; Campos-Pérez, M.D; Meléndez-Álvarez, M.D; Ramírez-Zuñiga, K.M. La mosca barrenadora (*Cochliomyia hominivorax*) y su reaparición reciente en costa rica: una actualización del tema. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 34-43.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7585>

1 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

✉ josalpizar@estudiantec.cr
ID <https://orcid.org/0009-0000-2220-6980>

2 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

✉ mecampos@estudiantec.cr
ID <https://orcid.org/0009-0001-9569-2008>

3 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

✉ mimelendez@estudiantec.cr
ID <https://orcid.org/0009-0001-9098-022X>

4 Ingeniería en Biotecnología, Bioquímica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

✉ kenramirez@estudiantec.cr
ID <https://orcid.org/0009-0001-6046-9199>



Palabras clave

Miasis; parásito endémico; insectos estériles; industria ganadera.

Resumen

La mosca *Cochliomyia hominivorax* es un parásito endémico del neotrópico americano y afecta principalmente a vertebrados de sangre caliente, causando miasis al introducir larvas en heridas abiertas. Esta mosca ha causado grandes pérdidas monetarias en la industria ganadera, además de haber afectado a la fauna salvaje. Asimismo, los humanos también se ven afectados por infecciones de larvas en piel, ojos, oídos o por la ingesta de huevos. Para erradicarla, se utilizaron insectos estériles, una estrategia que funcionó por más de 20 años, hasta la reaparición de casos de infección en animales y humanos durante 2023. Para este artículo se realizó una revisión bibliográfica, con finalidad de informar sobre las características morfológicas de la mosca, la bioquímica detrás de su infección, así como las soluciones propuestas que incluyen el uso de machos estériles y de moléculas químicas que matan o generan la expulsión de las larvas.

Keywords

Myiasis; endemic parasite; sterile insect; livestock industry.

Abstract

The *Cochliomyia hominivorax* fly is an endemic parasite of the American Neotropics and primarily affects warm-blooded vertebrates, causing myiasis by introducing larvae into open wounds. This fly has caused significant financial losses in the livestock industry and has even affected wildlife. Humans are also impacted by larval infections in the skin, eyes, ears, or through the ingestion of eggs. In the past, to eradicate it, the release of sterile males was used, a strategy that worked for over 20 years until the reappearance of infection cases in animals and humans in 2023. This article presents a bibliographic review to understand the morphological characteristics of the fly, the biochemistry behind its infection, and the proposed solutions, such as the use of sterile males and chemical molecules that kill or expel the larvae.

Introducción

El género *Cochliomyia* es endémico del neotrópico americano. De este, *C. hominivorax* y *C. macellaria* son las especies más abundantes en América. Ambas suelen confundirse fácilmente por sus características morfológicas semejantes, sin embargo *C. macellaria* es un parásito secundario al ser principalmente saprófago, mientras que, *C. hominivorax* es un parásito obligado de vertebrados de sangre caliente vivos [1].

La miasis se define como la infestación de vertebrados por larvas de dípteros, las cuales, se alimentan del tejido muerto o vivo del huésped [2]. Dependiendo de dónde ocurra la miasis tendrá diferentes términos, por ejemplo: puede ser cutánea, urogenital, oftálmica, auricular, nasofaríngea, oral, así como forunculosa (una sola larva), migratoria o rampante (avance infeccioso bajo la dermis), traumática (herida previa) o ulcerosa [3].

Antes de la década de 1950, *C. hominivorax* fue una plaga muy importante, dado que por sus infecciones se perdieron cientos de millones de dólares anuales en el sector de la industria ganadera de varios países en América [4]. Además de las infecciones en humanos y ganado, se han reportado afectaciones a la biodiversidad de vertebrados de sangre caliente en

América. En 2016 hubo un brote de *C. hominivorax* en Los Cayos, Florida (EE. UU.) que terminó con la vida de 135 venados cola blanca (*Odocoileus virginianus*) [5], una especie en peligro de extinción, también presente en Costa Rica. Otros animales salvajes, como el jabalí europeo (*Sus scrofa*), especie invasora en Costa Rica, son hospedadores comunes de *C. hominivorax* y posibles vectores para las infecciones en el ganado y los humanos en el continente americano [6].

El interés por entender más a fondo la infección causada por *C. hominivorax*, y evaluar el estado actual de la plaga en Costa Rica, nace de la reciente alerta por la presencia de infecciones en humanos y animales en el país. El 26 de febrero de 2024, se confirmó el primer caso por miasis de gusano barrenador en humanos [7], y desde entonces su incidencia ha ido en aumento. Alcanzó más de 5000 casos de gusano barrenador en el país, de los cuales, cerca del 75% se reportaron en ganado [8]. Con esta revisión se busca esclarecer las principales características de *C. hominivorax* y su biología, entender el cuadro clínico que ocasiona la miasis, indagar en las estrategias de control o erradicación existentes, evaluar el estado actual de la situación en Costa Rica y brindar perspectivas para el futuro. Se busca que pueda ser tomada en cuenta por los países centroamericanos y tropicales ante la presencia de esta preocupante plaga en la búsqueda de soluciones para el problema que representa.

Características morfológicas

Las larvas de *C. hominivorax* son de un color amarillo pálido y poseen espinas en cada segmento corporal. De textura cilíndrica robusta, de 6 a 17 mm de largo y 1.6 a 3.5 mm de ancho, presentan un aparato bucal en forma de ganchos afilados útiles para perforar tejido vivo [9]. Las larvas se alimentan entre 4-10 días hasta escapar del hospedador y enterrarse en la tierra por 3 meses en estado de pupa. Pasados cerca de 5 días tras emerger, las moscas adultas empiezan a cortejar y aparearse [9].

El tórax de las adultas de *C. hominivorax* se caracteriza por una intensa coloración azul o azul-verdoso metálico, con tres franjas longitudinales oscuras y cubierto de setas cortas doradas [9]. Hay un marcado dimorfismo sexual en las moscas adultas, pues las hembras son dicópticas y los machos son holópticos o subholópticos [10].

Características diferenciadoras entre especies *Cochliomyia*

En el tercer estadio, las larvas de *C. hominivorax* poseen una coloración intensa en los troncos traqueales, desde los espiráculos posteriores hasta el undécimo segmento. Sin embargo, *C. macellaria* no presenta coloración intensa en los troncos traqueales [9]. Además, en *C. macellaria* solo se pueden encontrar vellos amarillos en las placas fronto-orbitales [10]. Un trabajo de Lyra *et al.* [1], utilizó la morfometría de las alas como una prueba rápida para discernir entre *C. hominivorax* y *C. macellaria*.

Características diferenciadoras entre moscas barrenadora y de tórpedo

Es común entre la población confundir la mosca del gusano barrenador (*C. hominivorax*) con la típica mosca de tórpedo (*Dermatobia hominis*) (Oestridae). Es importante reconocer que difieren tanto en familia como en el daño que son capaces de causar. *C. hominivorax* es reconocida por ser un parásito de tipo obligado [12]. Su infección se adquiere directamente cuando la mosca adulta pone sus huevos en el hospedero. Esta característica le da menos probabilidades de completar con éxito la puesta de huevos en un huésped humano sano y alerta [13]. Por otro lado, las larvas de *D. hominis* son de tipo migratoria cutánea [12] y usan una modalidad indirecta en la que la hembra deposita sus huevos en el abdomen de otros dípteros (mosquitos) que cuando pican a un animal, dejan los huevos y las larvas emergen y penetran en la piel [14].

Además *C. hominivorax* posee órganos receptores que perciben fácilmente heridas que supuran y secreciones corporales. Sus larvas son capaces de desgarrar tejidos sumamente duros, y al romper la superficie inyectan enzimas que degradan tejidos vivos para disolverlos y alimentarse [14]. Por ejemplo, en casos de miasis cerca de la zona ocular, la destrucción rápida de los tejidos adyacentes incluidos huesos y meninges, puede provocar la muerte del huésped; esta destrucción del tejido puede ocurrir por medios mecánicos y por la producción de colagenasa [13]. Por otro lado, la infección del tórax se limita a lesiones u abscesos en la piel con solo una larva, y esta puede infestar moderadamente y causar que los animales coman menos. En pocas ocasiones, los abscesos evolucionan a hinchazones grandes que llegan a causar la muerte del animal, pero esto sucede más frecuentemente en los animales jóvenes [15].

Cuadro Clínico

La miasis puede ocurrir en diversas cavidades corporales o zonas heridas. La miasis intestinal se produce en casos de ingestión accidental de huevos de la mosca, y la urogenital puede presentarse como obstrucción ureteral o dolor lumbar en casos crónicos [16]. Durante la infección larvaria se presenta fuerte dolor en la zona y prurito que aumenta con el tiempo. Se presenta un nódulo no migratorio en la piel y puede provocar destrucción del cartílago y la bóveda palatina; en algunos casos las larvas llegan a la cavidad craneana. Cuando la infección se agrava, puede provocar la muerte [17]. Las principales zonas parasitadas en los humanos son las piernas o los pies. Cuando la infección ocurre en la cabeza, suele ser en personas de baja estatura, como niños o personas postradas en cama [18].

Se han estudiado características relacionadas con la predisposición de algunos seres humanos a sufrir una infección por gusano barrenador. Las heridas abiertas fueron la principal causa de la parasitosis. Además, la higiene personal, el bajo nivel educativo, el alcoholismo, el encamamiento y la discapacidad física o mental se describen como posibles factores secundarios. Es usual que los pacientes sean ancianos, enfermos y debilitados. El alcohol se puede vincular por la insensibilidad que causa, además de que se asocia con un retraso en la búsqueda de atención médica [18].

Respuesta inmunológica de los huéspedes

Activación de la inmunidad innata

La infección por larvas que causan miasis tiene efectos potencialmente peligrosos para el huésped, por lo que se produce una respuesta inmune innata con el fin de potenciar la defensa contra este parásito. La respuesta inmune inicial es inducida por los antígenos larvarios en la superficie de la herida, lo que implica que la actividad celular aumenta y promueve la proliferación de basófilos, mastocitos y eosinófilos que juegan un papel importante en la citotoxicidad contra el parásito [19].

Mecanismos de inmunidad adaptativa

Además de la respuesta innata, existe una respuesta humoral por parte de células B al generar anticuerpos como IgG o IgE que producen un efecto de defensa ante infecciones futuras. Por otra parte, las respuestas secundarias son debidas, en su mayoría, a la interacción de los antígenos con moléculas del complejo principal de histocompatibilidad (MHC) clase II. Además, las interleucinas (IL-12) liberadas por células presentadoras de antígenos (APC) promueven la acción de linfocitos Th1 y Th2, así como la liberación de citocinas proinflamatorias y de inmunorregulación importantes para combatir la infección de esta larva [14].

Opciones terapéuticas y desarrollo de estrategias de prevención

Dentro de los métodos de tratamiento destaca la aplicación de sustancias tóxicas para las larvas como la ivermectina, ya sea por vía oral o cutánea con propilenglicol. También la lidocaína al 1% es efectiva para la parálisis del insecto [16]. Sumado a esto, se ha considerado el desarrollo de vacunas que puedan prevenir futuras infecciones. Estas vacunas aprovechan los antígenos inflamatorios para crear una inmunidad. Por ejemplo, con la secuenciación de aminoácidos de un antígeno extraído de membrana peritrófica, es posible crear una vacuna de antígeno recombinante para utilizarla como método de prevención que aumenta la mortalidad larvaria de un 55% a un 99% [19].

Productos metabólicos implicados

Las larvas de *C. hominivorax* producen diferentes proteasas. La caracterización bioquímica de estas moléculas puede proporcionar información sobre los mecanismos de interacción parásito-huésped que intervienen en el establecimiento y desarrollo de la miasis causada por la mosca. Como se mencionó, las larvas se alimentan de tejidos vivos, por lo que se puede suponer que necesitan producir cantidades sustanciales de enzimas proteolíticas. En diversos estudios, se ha identificado una mayor actividad proteolítica por la serina proteasa [19]. Otras propiedades encontradas en los productos metabólicos de los gusanos barrenadores, al ser estudiadas *in vitro* fueron hemolíticas y anticoagulantes [20]. Los casos de gusano barrenador no tratados pueden ser fatales debido a la invasión de los órganos vitales del huésped, septicemia causada por la alimentación de los gusanos o infecciones secundarias [21].

Por otro lado, se ha encontrado actividad de enzimas capaces de hidrolizar fosfolípidos dentro de los intestinos de larvas de *C. hominivorax*. Aliza *et al.* [22], menciona que las larvas obtienen ácido araquidónico gracias a la actividad de una fosfolipasa A2 bastante parecida a la mamífera (sensibilidad a inhibidores, dependencia al calcio semejante e interactividad con heparina). Esta enzima podría jugar un papel importante en la adquisición de ácidos grasos esenciales a partir de los fosfolípidos del huésped.

Estrategias de control y erradicación

Técnica del Insecto Estéril (TIE/SIT)

La lucha contra la mosca barrenadora se ha sometido a constante evolución. A medida que se ha profundizado el conocimiento sobre el insecto, las estrategias de control han ido sofisticándose, por lo que es valioso revisar históricamente los intentos de erradicación más importantes, en especial en la región de América, Costa Rica y alrededores. El primero es la técnica de insectos estériles (TIE) o, (SIT por sus siglas en inglés), que ha evolucionado en la cría para la producción de las moscas desde la alimentación a base de carne, luego hidropónica, y más recientemente mediante una dieta basada en gel. La técnica esterilización sexual es irradiación, en cuyos primeros trabajos experimentales se usaron rayos X, luego cobalto-60 y cesio-137 (desde 1962 hasta lo más recientemente reportado) [23, 24].

Con la implementación de esta técnica, se creó una zona barrera en la que el gusano barrenador fue eliminado exitosamente desde América del Norte hasta la frontera de Panamá y Colombia, que se mantiene gracias a la Comisión Panamá-Estados Unidos; esta libera aproximadamente 15 millones de moscas estériles semanalmente. La calidad de las larvas de *C. hominivorax* criadas en masa está determinada por la disminución del número de casos de miasis, que indica que los adultos estériles liberados, en particular los machos estériles, compiten por parejas

fértils. Para mantener la eficacia, las cepas utilizadas en la cría en masa se cambian cuando pierden efectividad. Se desarrollan líneas de hembras recolectadas en áreas no afectadas por enfermedades. En 1992 y 1995 se emplearon líneas provenientes de Costa Rica [23].

Innovaciones transgénicas y edición genética

Para mejorar la técnica, se ha sugerido liberar solo machos estériles, ya que las hembras estériles no contribuyen a la supresión genética. Se han desarrollado modelos iniciales en *Drosophila melanogaster* para crear machos estériles, usando promotores específicos y marcadores fluorescentes. A largo plazo, se espera que las cepas transgénicas con solo machos sean más eficientes que las liberaciones de ambos sexos. Las tecnologías de edición genómica como CRISPR/Cas9 podrían desarrollar sistemas de impulso genético para transformar hembras en machos, lo que reduciría significativamente la cantidad de insectos estériles necesarios para el control [23].

Resistencia a insecticidas convencionales y nuevos tratamientos en animales

El método de dispersión de machos estériles resulta en una de las mejores formas de tratar esta plaga, ya que recientes estudios han demostrado el desarrollo de una resistencia a los organofosforados. Estos insecticidas afectan la actividad nerviosa al descomponer el neurotransmisor acetilcolina, lo que sobreestimula y bloquea los receptores, y paraliza el insecto y causa su muerte. La resistencia a este insecticida se basa en mutaciones para Gly137Asp y Trp251Ser de la secuencia codificante en la enzima esterasa E3, la cual logra descomponer los compuestos organofosforados e impide la inactivación del neurotransmisor [25].

Existen también estrategias para tratar los casos de miasis en animales, y disminuir la tasa de expansión de la enfermedad en el territorio afectado. Para esto, se pueden emplear diferentes sustancias químicas como la isoxazolina lotilaner. Esta actúa como un antagonista no competitivo en los canales de cloruro de los artrópodos, que son activados por GABA (ácido gamma-aminobutírico). Este parasitícola se considera sistémico ya que viaja en la sangre y afecta a las larvas. Además, se suministra en forma de tableta masticable y ha demostrado su efectividad tanto en perros como en gatos afectados por miasis [25, 26].

Para 2021, se reportó haber erradicado la infección en Estados Unidos, México, Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá al norte del Canal y algunas islas del Caribe. La mayoría de los países sudamericanos siguen infectados, lo que pone en riesgo los territorios libres del parásito y los países donde naturalmente *C. hominivorax* no se encuentra. Hay ejemplos de fallos al prevenir que el gusano barrenador vuelva a invadir territorios donde había sido erradicado, como en 2016 y 2017, que se encontró una infección en una población de ciervos salvajes en Florida, Estados Unidos [27].

Actualidad: Caso de Costa Rica

Registrado por primera vez en territorio costarricense en las décadas de 1980 y 1990, el gusano barrenador fue una plaga erradicada a lo largo del norte del continente americano y Centroamérica. Los primeros países en conseguirlo fueron Estados Unidos (1966) y México (1991), posteriormente se erradicó en Guatemala (1994), Honduras (1996), Nicaragua (1998) y Costa Rica (2000) [28]. Después de 24 años sin casos reportados, el 14 de julio de 2024 Costa Rica reportó un nuevo caso de miasis humana por gusano barrenador en la provincia de Puntarenas. Su movimiento hacia este espacio geográfico fue posible por condiciones climáticas y la migración de especies susceptibles a esta plaga [28]. En respuesta a este caso documentado en julio de 2024, se aplicó una estrategia de control biológico apoyada en la

liberación de moscas estériles de una nueva cepa desarrollada en Panamá. Esta intervención involucró más de 30 millones de insectos liberados y demostró la eficacia de la Técnica del Insecto Estéril. [29].

Hasta octubre de 2024, se han reportado 34 casos de miasis en Costa Rica, siendo la región Brunca la más afectada, con 13 casos. Además, se ha observado que la población más susceptible a este tipo de infecciones es aquella con una edad mayor a 75 años. Las infecciones ocurren mayormente en zonas anatómicas como cabeza, cuello, miembros inferiores y parte externa del oído. Los casos de miasis en el país se reportan en mayor medida en zonas rurales con alta exposición de animales domésticos y ganado. Sin embargo, gracias a la capacidad de las moscas para desplazarse largas distancias, las zonas urbanas también pueden verse afectadas [30].

Discusión

La presencia de la larva de *C. hominivorax* en Costa Rica representa una amenaza latente que sugiere un seguimiento cuidadoso de esta mosca. Costa Rica no es un caso aislado; a través de los años distintos países del continente americano evidenciaron la erradicación exitosa, sin embargo, rebrotos importantes han sido indicadores de sesgos en la prevención, como el ejemplo dado de la infección de ciervos salvajes en Florida.

En contraste con otros países americanos, se puede decir que en Costa Rica no se puede denunciar como principal causante la desatención de esta plaga, ya que se evidencia que las técnicas de control son compartidas por muchos países, siendo la Técnica del Insecto Estéril la más común, la cual también falló para Estados Unidos. Asimismo, se comprende que las particularidades geográficas, ecológicas y sociales de distintas regiones dificultan la erradicación, por ejemplo, en países sudamericanos con gran extensión territorial o zonas con alto índice de animales domésticos y ganaderos. Además, el creciente cambio climático es un detonante para la reaparición de brotes, favorecido por las migraciones de animales que podría desencadenar infecciones en países donde no se tenga registro de este insecto, lo que plantea desafíos similares a los enfrentados en Costa Rica.

Perspectivas futuras

Existe preocupación de que la incidencia de estas infecciones incremente de manera significativa, tanto en humanos como en animales. Además del uso de insecticidas y trampas, es importante reconocer la posibilidad de mejorar la Técnica del Insecto Estéril (o SIT por sus siglas en inglés), ya que esta técnica se considera clave para erradicar nuevamente la mosca en Costa Rica. Por ejemplo, se ha discutido la posibilidad de usar líneas transgénicas de moscas macho únicamente para hacer la TIE más eficiente. Un ejemplo, descrito por Arp *et al.* [32], es el de cepas de insectos transgénicos con un sistema de represión por tetraciclina (Tet-Off). Estos sistemas de sexado transgénico tienen el potencial de ser rentables y altamente confiables para su implementación en programas de cría en masa, sin embargo, los sistemas de sexado con represión Tet-Off dependen del uso de antibióticos como la tetraciclina para mantener las colonias de insectos, lo que podría impactar su idoneidad para la cría en masa [32]. Ante esto, se propone el uso de doxiciclina como una alternativa viable a la tetraciclina, sin embargo, sigue siendo un antibiótico que puede contribuir a la resistencia de microorganismos, que se ha convertido en un problema [32].

Estas alternativas o herramientas en desarrollo como lo puede ser el SIT representan posibles soluciones para el reciente rebrote en Costa Rica, y ofrecen beneficios económicos significativos debido a su propuesta ante un problema que afecta al sector ganadero y las industrias que

derivan de ello, reduciendo tanto costos como trabajo, al disminuir las pérdidas por animales enfermos y a los tratamientos (incluido el seguimiento que se requiere) que se les deben aplicar para sobreponer la infección.

Por lo tanto, es importante que estas alternativas novedosas se trabajen de manera adecuada, para superar limitaciones ya mencionadas, como el uso de antibióticos, de modo que se pueda tanto erradicar nuevamente la mosca barrenadora en Costa Rica al introducir nuevos métodos para mejorar la barrera de moscas estériles, como extenderla a otras partes del continente americano. De esta manera, se destaca la importancia de utilizar los recursos y la experiencia de gobiernos de América Central y del Norte, y que los países afectados realicen evaluaciones nacionales sobre la situación del gusano barrenador, incluyendo su distribución geográfica, genética poblacional, y el impacto económico, para promover la búsqueda de opciones innovadoras, rentables y sostenibles que ayuden a mitigar este problema de salud pública regional.

Conclusiones

A pesar de los esfuerzos implementados en la erradicación de *C. hominivorax*, aún existen deficiencias en los sistemas utilizados. Una reaparición de este insecto en diferentes países como Costa Rica puede estar asociada a fallas en la barrera de insectos estériles, una resistencia a los insecticidas o migraciones de hospederos. Una de las razones para la dispersión agresiva de la plaga es que las larvas producen enzimas como la serina proteasa y la fosfolipasa A2 que permiten la invasión a los tejidos y facilitan su incidencia en el ganado y el paso a seres humanos. Esto sugiere que las estrategias de erradicación deben evaluarse continuamente y estar ajustadas a los cambios evolutivos por tratarse de un agente biológico que se adapta a las diversas condiciones.

En relación con esto, se propone un método de acción enfocado en el mejoramiento de la Técnica de Insecto Estéril, como lo es el uso de líneas transgénicas de moscas macho con un nuevo sistema de represión por doxiciclina, lo cual podría compensar las deficiencias de la barrera actual. Sin embargo, aún se debe analizar la resistencia a antibióticos que puede traer consigo estas técnicas.

Por último, a lo largo de este artículo se da una revisión de la biología y respuestas involucradas en la infección de *C. hominivorax* con el fin de comprender su patogenicidad para lograr obtener soluciones futuras basadas en los mecanismos de acción bioquímica. Además, con esto se contribuye a entender el resurgimiento de esta plaga en Costa Rica, al compararlo con otras regiones susceptibles, con el fin de evaluar los métodos actuales y así lograr soluciones innovadoras y viables para otros países.

Referencias

- [1] M. Lyra, L. Hatadani, A. de Azeredo-Espin, y L. Klaczko, "Wing morphometry as a tool for correct identification of primary and secondary New World screwworm fly," *Bulletin of Entomological Research*, vol. 100, pp. 19–26, 2010. <https://doi.org/10.1017/s0007485309006762>
- [2] F. Zumpt, *Myiasis in Man and Animals in the Old World. A Textbook for Physicians, Veterinarians and Zoologists*, London: Butterworth, 1965.
- [3] A. Maciá, M. V. Micieli, y P. R. Mulieri, "Miasis," *Entomología médica y veterinaria: biología y sistemática de artrópodos de interés médico y veterinario en Argentina*. La Plata, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP), 2023, pp. 117-127.
- [4] C. Concha *et al.*, "A transgenic male-only strain of the New World screwworm for an improved control program using the sterile insect technique," *BMC Biology*, vol. 14, art. 76, pp. 1–13, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12915-016-0296-8>.

- [5] R. G. Marburger y J. W. Thomas, "A die-off in white-tailed deer of the central mineral region of Texas," *The Journal of Wildlife Management*, vol. 29, no. 4, pp. 706–716, 1965. <https://doi.org/10.2307/3798546>.
- [6] M. Altuna *et al.*, "New World screwworm (*Cochliomyia hominivorax*) myiasis in feral swine of Uruguay: One Health and transboundary disease implications," *Parasites & Vectors*, vol. 14, pp. 1–9, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-04499-z>.
- [7] Ministerio de Salud de Costa Rica, "Salud reporta primer caso en seres humanos de gusano barrenador," Gobierno de Costa Rica, 26 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.minsiteriodesalud.go.cr/index.php/prensa/61-noticias-2024/1809-salud-reporta-primer-caso-en-seres-humanos-de-gusano-barrenador#:~:text=La%20semana%20pasada%2C%20el%20Ministerio,despu%C3%A9s%20de%20sufrir%20una%20ca%C3%ADda>. [Accedido: 10 de noviembre de 2024].
- [8] T. Foulger, "Casos de gusano barrenador llegan a 5 mil en Costa Rica," *La República*, 16 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/casos-de-gusano-barrenador-llegan-a-5-mil-en-costa-rica>. [Accedido: 10 de noviembre de 2024].
- [9] M. Akhouni *et al.*, "Morphological and Molecular Characterizations of *Cochliomyia hominivorax* (Diptera: Calliphoridae) Larvae Responsible for Wound Myiasis in French Guiana," *Diagnostics*, vol. 13, pp. 2575, 2023. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13152575>
- [10] T. Mastrangelo y J. B. Welch, "An overview of the components of AW-IPM campaigns against the New World screwworm," *Insects*, vol. 3, pp. 930–955, 2012. <https://doi.org/10.3390/insects3040930>
- [11] J. P. Spradberry, *A Manual for the Diagnosis of Screw-Worm Fly*, Australian Government Publishing Service, 2002.
- [12] D. R. Sharman, *Fiebre Aftosa y Otras Zoonosis*. Washington, D.C., Estados Unidos: Organización Panamericana de la Salud, pp. 111, 1970.
- [13] J. Chodosh y J. Clarridge, "Ophthalmomyiasis: a review with special reference to *Cochliomyia hominivorax*," *Clinical Infectious Diseases*, vol. 14, pp. 444–449, 1992. <https://doi.org/10.1093/clinids/14.2.444>.
- [14] J. J. A. Hernández-Hernández, W. A. López Lemus, y Á. D. Luna Romero, "Incidencia de miásis por tórsalo en los Municipios de San Fernando y San José Ojos de Agua, halatenango en el periodo de Enero a Agosto del 2016," Tesis de Doctorado, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador, 2016.
- [15] Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica, Tórsalo, Departamento de Información Agrícola, 2010, pp. 1–6. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1101.pdf>.
- [16] A. Singh y T. Banerjee, "Myiasis," *Textbook of Parasitic Zoonoses*, Springer, 2022, pp. 623–631.
- [17] P. Acha y B. Szfres, *Zoonosis Y Enfermedades Transmisibles Comunes Al Hombre Y a Los Animales*, Washington, DC: OPS, 2003.
- [18] J. A. Batista-da Silva, G. E. Moya-Borja, y M. M. Queiroz, "Factors of susceptibility of human myiasis caused by the New World screwworm, *Cochliomyia hominivorax* in São Gonçalo, Rio de Janeiro, Brazil," *Journal of Insect Science*, vol. 11, pp. 14, 2011. <http://dx.doi.org/10.1673/031.011.0114>
- [19] D. Otranto, "The immunology of myiasis: Parasite survival and host defense strategies," *Trends in Parasitology*, vol. 17, pp. 176–182, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1471-4922\(00\)01943-7](https://doi.org/10.1016/S1471-4922(00)01943-7).
- [20] R. Giglioti *et al.*, "Proteolytic activity of excretory/secretory products of *Cochliomyia hominivorax* larvae (Diptera: Calliphoridae)," *Pesquisa Veterinária Brasileira*, vol. 36, pp. 711–718, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-736X2016000800006>.
- [21] J. H. Esslinger y A. C. Chandler, "Studies on the properties of the metabolic products of the screwworm, *Callitroga hominivorax* (Coquerel)," *Experimental Parasitology*, vol. 8, pp. 527–538, 1959. [https://doi.org/10.1016/S0014-4894\(59\)80002-3](https://doi.org/10.1016/S0014-4894(59)80002-3).
- [22] A. N. Aliza *et al.*, "Tissue polyunsaturated fatty acids and a digestive phospholipase A2 in the primary screwworm, *Cochliomyia hominivorax*," *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 29, pp. 1029–1038, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0965-1748\(99\)00080-6](https://doi.org/10.1016/S0965-1748(99)00080-6).
- [23] M. J. Scott *et al.*, "Review of research advances in the screwworm eradication program over the past 25 years," *Entomologia Experimentalis et Applicata*, vol. 164, pp. 226–236, 2017. <https://doi.org/10.1111/eea.12607>.
- [24] J. Núñez, "15 años sin plaga de gusano barrenador," *Campus*, 7 de julio de 2016. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.una.ac.cr/server/api/core/bitstreams/63129837-e31c-4d64-8254-96ecbe16ae15/content>. [Accedido: 12 de noviembre de 2024].
- [25] S. Tandonnet *et al.*, "Molecular basis of resistance to organophosphate insecticides in the New World screwworm fly," *Parasites & Vectors*, vol. 13, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13071-020-04433-3>.

- [26] T. L. do Vale *et al.*, "Efficacy of lotilaner against myiasis caused by *Cochliomyia hominivorax* (Diptera: Calliphoridae) in naturally infested dogs," *Parasites & Vectors*, vol. 6, p. 86, 2023. <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05661-z>.
- [27] M. Vargas-Terán *et al.*, "Impact of Screwworm Eradication Programmes Using the Sterile Insect Technique," *Sterile Insect Technique*, 2.^a ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 2021, pp. 949–978. https://doi.org/10.1007/1-4020-4051-2_24.
- [28] F. Pomareda García, "¿Por qué reapareció la enfermedad del gusano barrenador del ganado en Costa Rica?," *Semanario Universidad*, 26 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://semanariouniversidad.com/pais/por-que-reaparecio-la-enfermedad-del-gusano-barrenador-del-ganado-en-costa-rica/>. [Accedido: 12 de noviembre de 2024].
- [29] T. Gutiérrez Wa-Chong, "Costa Rica planea liberación masiva de moscas estériles para combatir gusano barrenador," *La República*, 12 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/costa-rica-planea-liberacion-masiva-de-moscas-esteriles-para-combatir-gusano-barrenador>. [Accedido: 12 de noviembre de 2024].
- [30] Ministerio de Salud, "Salud confirma caso de Miasis por gusano barrenador en niña condición migrante.", Gobierno de Costa Rica, 23 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/prensa/61-noticias-2024/1974-salud-confirma-caso-de-miasis-por-gusano-barrenador-en-nina-condicion-migrante>. [Accedido: 11 de noviembre de 2024].
- [31] P.R. Mulieri y L.D. Patitucci, "Using ecological niche models to describe the geographical distribution of the myiasis-causing *Cochliomyia hominivorax* (Diptera: Calliphoridae) in southern South America," *Parasitol.Res*, vol. 118, no. 4, pp. 1077–1086. <https://doi.org/10.1007/s00436-019-06267-0>.
- [32] A. P. Arp, M. E. Williamson, M. Vasquez, G. Quintero, A. Vargas Lowman, A. Sagel, y M. J. Scott, "Doxycycline is a viable alternative to tetracycline for use in insect Tet-Off transgenic sexing systems, as assessed in the blowflies *Cochliomyia hominivorax* and *Lucilia cuprina* (Diptera: Calliphoridae)," *Journal of Economic Entomology*, vol. 117, no. 2, pp. 650–659, 2024. <https://doi.org/10.1093/jee/toae023>.

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 de la aplicación del veneno de familias de arañas tropicales para diferentes terapias farmacológicas

Analysis of the application of venom from tropical spider families for different pharmacological therapies

Eunice Córdoba-Fernández¹, Gaudy Ariadna Hernández-Chang², Justine Andrea Rojas-Aguilar³, David Salazar-Solano⁴, Yanice Segura-Álvarez⁵

Fecha de recepción: 15 de noviembre, 2024

Fecha de aprobación: 21 de marzo, 2025

Córdoba-Fernández, E; Hernández-Chang, G.A; Rojas-Aguilar, J.A; Salazar-Solano, D; Segura-Álvarez, Y. Análisis de la aplicación del veneno de familias de arañas tropicales para diferentes terapias farmacológicas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 44-53.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7588>

- 1 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
 eucordoba@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-7384-776X>
- 2 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
 gauhernandez@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0006-1536-2233>
- 3 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
 jusrojas@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0008-4670-9206>
- 4 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
 davsalazar@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0004-6940-4238>
- 5 Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
 yasegura@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0009-0007-0759-7398>



Palabras clave

Disfunción eréctil; autoinmune; cáncer; neuroprotección; antiinflamatorio; antibacterial; veneno.

Resumen

El veneno de araña tropical ha ganado cada vez más atención en el campo médico debido a su riqueza en toxinas con potencial terapéutico. Estas sustancias, que han evolucionado independientemente en múltiples linajes de artrópodos, presentan propiedades farmacológicas prometedoras para el tratamiento de disfunción eréctil, enfermedades autoinmunes, trastornos neurodegenerativos, cáncer y dolores crónicos. El objetivo de este estudio fue recopilar y analizar evidencia científica sobre las principales terapias experimentales desarrolladas a partir del veneno de arañas tropicales. Para ello, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica centrada en compuestos aislados de especies representativas como *Phoneutria nigriventer*, *Pardosa astrigera*, *Psalmopoeus cambridgei* y *Acanthoscurria gomesiana*. Entre los hallazgos más relevantes se destaca el uso de la toxina PnTx2-6 de *P. nigriventer*, asociada con mecanismos de erección; los péptidos antimicrobianos y antiinflamatorios de arañas lobo (Lycosidae); la acción neuroprotectora y analgésica de la psalmotoxina-1; y el potencial anticancerígeno de la gomesina extraída de hemolinfa de tarántulas. En conjunto, los resultados sugieren que el veneno de arañas tropicales representa una fuente valiosa de compuestos bioactivos con aplicaciones médicas. No obstante, su investigación requiere un enfoque regulado y sostenible que respete la biodiversidad y la normativa vigente.

Keywords

Erectile dysfunction; autoimmune; cancer; neuroprotection; anti-inflammatory; antibacterial; venom.

Abstract

Tropical spider venom has gained increasing attention in the medical field due to its richness in toxins with therapeutic potential. These substances, which have independently evolved in multiple arthropod lineages, exhibit promising pharmacological properties for the treatment of erectile dysfunction, autoimmune diseases, neurodegenerative disorders, cancer, and chronic pain. The objective of this study was to compile and analyze scientific evidence on the main experimental therapies developed from tropical spider venom. To this end, an extensive literature review was conducted focusing on compounds isolated from representative species such as *Phoneutria nigriventer*, *Pardosa astrigera*, *Psalmopoeus cambridgei*, and *Acanthoscurria gomesiana*. Among the most relevant findings are the use of the toxin PnTx2-6 from *P. nigriventer*, associated with erection mechanisms; the antimicrobial and anti-inflammatory peptides from wolf spiders (Lycosidae); the neuroprotective and analgesic action of psalmotoxin-1; and the anticancer potential of gomesin extracted from tarantula hemolymph. Overall, the results suggest that tropical spider venom represents a valuable source of bioactive compounds with medical applications. However, its research requires a regulated and sustainable approach that respects biodiversity and existing regulations.

Introducción

Las arañas, al igual que los escorpiones y las garrapatas, son artrópodos de la clase Arachnida y se encuentran entre los principales representantes de interés médico de esta clase, con una amplia distribución mundial [1]. Han sido utilizados en medicina animal y humana desde tiempos antiguos [2]. Los mecanismos de envenenamiento han evolucionado independientemente en al menos 19 linajes de artrópodos, donde las arañas representan el orden más diverso en cuanto a especies venenosas [3]. De las 134 familias registradas de arañas, solo una no produce veneno, por una pérdida secundaria de sus glándulas venenosas [4]. Usando sus glándulas intergumentales, las arañas producen toxinas como fosfolipasas, hialorunidas, serinoproteasas, metaloproteinasas, neurotoxinas, factores inhibidores de las proteasas, factores de liberación de histamina y péptidos inhibidores de la cisteína (ICK) [5-6].

Al tener mezclas complejas de sustancias presentan una gran variedad de actividades farmacológicas que son herramientas relevantes para modular funciones biológicas a nivel celular y molecular. Se ha reportado que las moléculas de veneno tienen un papel importante en las enfermedades humanas, pero que también se han utilizado para diseñar nuevas terapias farmacológicas [7]. Por esto, en tiempos recientes, ha crecido el interés en el desarrollo de fármacos a partir de venenos y toxinas derivados de estos animales [8]. Sin embargo, no solo su veneno tiene potencial farmacológico, tejidos como la hemolinfa o microorganismos simbióticos de los artrópodos también presentan compuestos con gran potencial farmacológico por explorar [9-10].

El presente documento discute información disponible sobre el uso del veneno de las arañas para tratar condiciones como la disfunción eréctil (DE), enfermedades autoinmunes, neurodegenerativas, cáncer y dolores crónicos, así como el uso de estos compuestos con fines antibacteriales, analgésicos, antiparasitarios y antiinflamatorios. Por lo tanto, el objetivo del artículo es recopilar evidencia sobre las principales terapias que se han propuesto a partir de veneno de arañas tropicales.

Metodología

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica orientada a identificar estudios sobre el potencial terapéutico del veneno de arañas tropicales. La búsqueda de información se realizó utilizando los motores de búsqueda PubMed, ScienceDirect, SciELO y Google Scholar. Se emplearon palabras clave en español e inglés, tales como: *veneno de araña, péptidos bioactivos, arañas tropicales, potencial farmacológico, toxinas de araña, gomesina, neuroprotección, analgésico, antimicrobiano y fármaco derivado de toxinas*.

Se incluyeron publicaciones científicas en español e inglés, que presentaran estudios originales o revisiones relacionadas con el uso de compuestos derivados del veneno de arañas con fines farmacológicos. Se priorizaron artículos revisados por pares, publicados en revistas indexadas, que abordaran mecanismos de acción, efectos terapéuticos o ensayos experimentales *in vitro* e *in vivo*.

Familia *Ctenidae*

Debido a su toxicología, el género más importante es *Phoneutria*, que además es conocido vulgarmente como “arañas de los bananos”, “arañas errantes”, “armada” o “pico rojo” por sus tonalidades. Su veneno es neurotóxico de acción casi inmediata [11].

Veneno de *Phoneutria nigriventer* (araña errante brasileña) para la disfunción eréctil (DE)

El priapismo se define como una tumescencia persistente no relacionada con la estimulación sexual, considerada una emergencia médica causada por la disminución o ausencia del drenaje venoso. Esta afección aparece posterior a una intoxicación sistemática causada por la picadura de *P. nigriventer* en humanos y animales. Debido a las dificultades que presenta extraer el veneno de *P. nigriventer*, se ha identificado y producido por biología sintética [7].

Para crear una terapia o un fármaco que ayude con la disfunción eréctil, primero se debe estudiar el mecanismo eréctil. La erección del pene depende de estímulos periféricos o del sistema nervioso central (SNC). Los mecanismos implican la relajación de las células del músculo liso en el cuerpo cavernoso (CC), desencadenada por la difusión de NO en las células musculares adyacentes, que se une a la guanilil ciclasa soluble (sGC), catalizando la conversión de trifosfato de guanosina (GTP) a monofosfato de guanosina cíclico (cGMP). Esto disminuye el Ca²⁺ citosólico, generando la etapa de tumescencia (aumento del flujo sanguíneo hacia los genitales). Para la detumescencia (disminución del flujo sanguíneo hacia los genitales), el proceso debe invertirse hacia la vasoconstricción, lo que requiere la hidrólisis de cGMP por la fosfodiesterasa tipo 5 (PDE5) y la activación de la vía Rho-quinasa. Si existe un desequilibrio en estas vías, se causa la DE [7].

En estudios anteriores, se caracterizó cuatro familias distintas de neurotoxinas del veneno de *P. nigriventer*, denominadas toxinas *Phoneutria* (PhTx1, PhTx2, PhTx3 y PhTx4). El término PhTx engloba las toxinas, mientras que los números asignados derivan del procedimiento de purificación. Por otro lado, PnTx son las toxinas aisladas (péptidos) de cada fracción específica [3]. El veneno de la araña “armada” contiene la neurotoxina PnTx2-6, que provoca una lenta inactivación de varios canales de Na⁺, generando priapismo, una erección involuntaria y dolorosa. Para comprender este mecanismo y eliminar su toxicidad, se creó un péptido más pequeño, el PnPP-19, diseñado a partir de la molécula del veneno PnTx2-6 [7].

Estas toxinas PhTx2 inhiben la inactivación del canal sodio y son las principales responsables de los efectos neurotóxicos del veneno. Se reporta que PnTx2-5 y PnTx2-6 están relacionadas con la vía del óxido nítrico (NO)/GMP cíclico y son responsables de la erección observada en casos de envenenamiento por *Phoneutria*. Estas toxinas han sido estudiadas como modelo para desarrollar posibles fármacos contra la DE [12]. En un estudio de Lima *et al.* [13] se menciona que los fármacos comunes para la DE, como los inhibidores de PDE5, no son efectivos en un amplio espectro de pacientes. La PnTx2-6 fue capaz de revertir, en parte, la DE en modelos animales como ratas y ratones diabéticos, ancianos e hipertensos, mostrando un modelo prometedor para nuevos fármacos [13].

Un estudio de científicos brasileños de la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG) desarrolló un gel utilizando veneno de esta araña, basado en moléculas causantes de priapismo. Crearon una molécula sintética más simple y menos tóxica, el péptido BZ371A, probado con éxito en animales y humanos. Este gel mostró capacidad para activar la circulación sanguínea en la zona genital sin efectos tóxicos significativos [14].

Familia *Lycosidae*

La familia *Lycosidae*, conocida comúnmente como arañas lobo, se encuentra distribuida en zonas tropicales y templadas de todos los continentes [15].

Veneno de la araña *Pardosa astringera* para potencial uso antimicrobiano

Se ha establecido que la interacción de los péptidos antimicrobianos (AMP) catiónicos con los componentes de la membrana celular es un mecanismo fundamental que conduce a la muerte de las bacterias. Estos AMP, que poseen una carga positiva, tienen afinidad por las membranas bacterianas, que son generalmente negativas, lo que facilita su unión y penetración. Al alcanzar concentraciones adecuadas, estos péptidos se insertan en la bicapa lipídica de la membrana celular, donde alteran su estructura. Este proceso genera la formación de poros en la membrana, lo que provoca un aumento en la permeabilidad celular. Como resultado, se produce una fuga descontrolada de iones y otros componentes esenciales, lo que lleva a un desbalance osmótico y, finalmente, a la ruptura de la membrana [16].

Por ejemplo, la especie *Pardosa astringera*, una araña de la familia Lycosidae, contiene en su veneno una toxina denominada Lycotoxin-Pa4a. Un estudio realizado por Shin *et al.* demostró cómo esta toxina interactúa con las membranas bacterianas. Los resultados revelaron que Lycotoxin-Pa4a tiene una notable capacidad para inhibir casi por completo el crecimiento de bacterias como *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus cereus* y *Staphylococcus aureus* utilizando este mecanismo [17].

Además, se demostró que dos péptidos, LS-AMP-E1 y LS-AMPF1, inhiben de manera eficaz el crecimiento bacteriano al comprometer la integridad de las membranas celulares de forma rápida. Esta acción destructiva de los péptidos dificulta que las bacterias desarrollen resistencia contra ellos, lo que sugiere su potencial como agentes antimicrobianos en el tratamiento de infecciones bacterianas [18].

Veneno de las arañas *Lycosa singoriensis* y *Pardosa astrigera* como antiinflamatorio

Cuando hay una infección o una herida, los fibroblastos pueden liberar y aumentar la producción de citocinas como IL-6, IL-8, IL-1 β y TNF- α , que actúan como señales para coordinar la respuesta inflamatoria. Estas citocinas atraen células inmunes al sitio de la infección o lesión, ayudando a combatir patógenos y promover la cicatrización. Un estudio exploró uno de los mecanismos para inhibir esta actividad inflamatoria, probando el potencial de la toxina Licosina-II, proveniente del veneno de *Lycosa singoriensis*. El tratamiento con Licosina-II redujo significativamente la inflamación en tejidos al inhibir la producción de citocinas proinflamatorias en células de mamíferos infectadas con bacterias grampositivas y gramnegativas [19].

Otro estudio comprobó la actividad antiinflamatoria de la licotoxina-Pa4a aislada de *Pardosa astrigera*. Al agregar Lycotoxin-Pa4a junto con lipopolisacárido (LPS), se observó que disminuyó la producción de NO. Además, la expresión de otras moléculas proinflamatorias como iNOS, COX2, IL-1 β y TNF- α también se redujo, mientras que la IL-10, aumentó. La IL-10 reduce la producción de citocinas inflamatorias y ayuda a activar las defensas del cuerpo, lo que sugiere que este péptido podría influir tanto en la respuesta inmune inicial como en la adaptativa. Aunque aún no se conoce por completo su modo de acción, parece que Lycotoxin-Pa4a puede estar involucrado en las interacciones LPS/TLR4 [17].

Familia Theraphosidae

La familia Theraphosidae, conocida como tarántulas, predomina en regiones tropicales y subtropicales [15]. Algunas especies de esta familia producen venenos con compuestos bioactivos que han despertado interés en la investigación biomédica por la producción de toxinas con propiedades anticancerígenas, de neuroprotección y de analgesia, como *Psalmopoeus cambridgei* y *Acanthoscurria gomesiana* [15].

Veneno de *Psalmopoeus cambridgei* (tarántula chevron de Trinidad) para la neuroprotección y analgesia

De acuerdo con Mumtaz *et al.* [20], las toxinas provenientes del veneno de arañas tienen potencial en el estudio de patologías neurológicas al modular las vías de señalización celular. Estas toxinas actúan sobre varios objetivos moleculares, como receptores, canales iónicos y enzimas, incluyendo los canales de sodio (Na⁺), potasio (K⁺) y calcio (Ca²⁺), que son fundamentales en la excitabilidad neuronal y la liberación de neurotransmisores. Entre los componentes del veneno de arañas destacan los péptidos y proteínas ricas en disulfuro, que interactúan con las membranas celulares excitables y afectan la funcionalidad de los canales iónicos. Además, algunas toxinas del veneno de araña han demostrado tener propiedades neuroprotectoras, bloqueando la excitotoxicidad y protegiendo las células cerebrales del daño [20].

Así mismo, los canales iónicos son fundamentales para la propagación de potenciales de acción y la liberación de neurotransmisores en sinapsis excitatorias e inhibidoras, y su disfunción no solo está relacionada con enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer y el Parkinson, sino también con el dolor crónico [21]. Por lo tanto, los venenos de araña tienen potencial uso como neuroprotectores y analgésicos.

La psalmotoxina 1 (PcTx1) es un péptido constituido por 40 aminoácidos extraído del veneno de la tarántula *Psalmopoeus cambridgei* que cuenta con propiedades analgésicas contra el dolor térmico, mecánico, químico, inflamatorio y neuropático en roedores [22]. Este péptido actúa bloqueando el canal iónico 1a sensible al ácido, dando como resultado una activación de la vía endógena de la encefalina [22].

La inhibición dirigida del canal iónico sensible al ácido (ASIC1a) con salmotoxina-1 muestra un efecto neuroprotector al reducir el daño en las células ganglionares de la retina (CGR), tras haber sufrido una lesión por isquemia y reperfusión [23]. Esto se evidencia en la reducción de la activación de ASIC1a y ASIC2 y en la mejora de la función de las CGR. Además, la salmotoxina-1 atenúa la activación de calpaína, incrementa los niveles de Brn3a y catalasa, y no afecta los niveles de superóxido dismutasa-1 (SOD1) ni de glutatión peroxidasa-4 (GPX4) [23]. De acuerdo con Dibas *et al.* [23], estos efectos combinados destacan el potencial neuroprotector de la salmotoxina-1 ante ataques isquémicos.

Por otro lado, PcTx1 (π -TRTX-Pc1a) actúa como un inhibidor selectivo de los canales iónicos ASIC (canales de sodio activados por protones), y se une a las subunidades ASIC1a y ASIC1b, modificando la activación de estos canales al aumentar su afinidad por los protones. Esto provoca que el canal permanezca inactivo a un pH fisiológico de 7,4 [24]. A nivel estructural, la unión de PcTx1 está mediada a través del parche hidrofóbico compuesto por los residuos Trp7, Trp24, Phe30 (con contribuciones de la cadena lateral C4 de R26), mientras que la consecuencia funcional de la unión se debe al grupo básico cargado positivamente de Arg26, Arg27 y Arg28, que forman interacciones con los residuos sensores de protones en el bolsillo ácido [24].

La capacidad de PcTx1 para modular la actividad de ASIC1a también se manifiesta en su efecto sobre la desensibilización y la activación del canal. En concentraciones más altas, el péptido puede potenciar la actividad de ASIC1b y actuar como un agonista de cASIC1, por lo que PcTx1 puede estabilizar diferentes estados conformacionales de los canales ASIC dependiendo de las condiciones del entorno [24]. Este mecanismo de acción complejo implica que pequeñas variaciones en la interacción entre PcTx1 y los canales ASIC pueden resultar en cambios significativos en su función. Por lo tanto, PcTx1 actúa como un inhibidor, y además puede alterar la dinámica de activación y desensibilización de los canales iónicos, lo que resalta su potencial como herramienta en estudios farmacológicos y terapéuticos [24].

Gomesina aislada de hemolinfa de *Acanthoscurria gomesiana* para aplicaciones anticancerígenas

Acanthoscurria gomesiana es una especie sudamericana cuyos hemocitos contienen gomesina; este es un péptido con enlaces disulfuro que es aprovechado por el sistema inmunológico de la araña por sus propiedades antibióticas [25-26]. Además, exhibe prometedoras capacidades antitumorales [27].

Las propiedades citotóxicas de la gomesina se deben a su capacidad para permeabilizar las membranas celulares [28]. Para lograr esta desintegración de la membrana, se debe dar una acumulación de gomesina en la superficie celular, la cual es más efectiva en membranas con carga negativa y baja concentración de colesterol [28]. La gomesina causa un aumento en la concentración de Ca^{2+} en el citosol, lo que a su vez incrementa la producción de especies reactivas de oxígeno y de proteínas como p21, p27 y p53 [29]. Las altas concentraciones del ion provocadas por la gomesina también inducen necrosis en ciertos tipos celulares [30].

La gomesina tiene características químicas que la hacen apropiada para su uso como fármaco. Debido a sus puentes disulfuro, tiene una estabilidad sérica alta; distintos estudios reportaron valores de al menos 85% de péptido detectado después de 6 horas, y niveles de hasta 75% después de 24 horas [31-33]. Por otro lado, aunque la gomesina puede causar hemólisis, este efecto es moderado; concentraciones de hasta 100 μM inducen hemólisis menor al 40% en eritrocitos [28].

Convertir la gomesina a una estructura cíclica hace que sea un péptido aún más farmacológicamente apto. La gomesina cíclica demuestra una estabilidad sérica aún más alta pasadas las 24 horas; además, aumentó su citotoxicidad para las células tumorales, pero sin hacerlo para las células no cancerosas [33]. Otros autores reportan que, al ciclar este péptido, se logra una mayor resistencia a degradación proteolítica, tolerancia a sustitución de aminoácidos y mayor selectividad por los canales aniónicos, presentes en células cancerosas [34]. La mutación es otra posible vía para el mejoramiento de este péptido, aunque es un proceso menos directo [28].

La gomesina disminuye la proliferación de distintos tipos de células cancerosas *in vitro*, incluyendo melanoma, leucemia y neuroblastoma [32-35]. Se ha evidenciado la eficacia de gomesina para inhibir el desarrollo de tumores faciales de demonio de Tasmania e inducir muerte de las células tumorales *in vitro*, siendo un candidato prometedor para tratar esta condición fatal [29]. También, un ensayo *in vivo* demostró la capacidad de este péptido para frenar el desarrollo de melanoma en roedores por aplicación cutánea [36].

Discusión

Los venenos de arañas tropicales poseen un amplio potencial farmacológico con aplicaciones en terapias antibacteriales, antiinflamatorias, analgésicas, así como en el tratamiento de enfermedades autoinmunes, neurodegenerativas, disfunción eréctil, cáncer y dolor crónico. Algunos estudios han destacado el valor de compuestos como la PnTx2-6, la Lycotoxin-Pa4a, la psalmotoxina-1 y la gomesina como base para el desarrollo de nuevas terapias. No obstante, la transición de estos hallazgos desde la investigación hacia aplicaciones clínicas aún enfrenta retos, como la toxicidad de los péptidos en su forma natural, la producción a gran escala, la estabilidad de las moléculas y la variabilidad en las respuestas biológicas. A esto se suman importantes consideraciones éticas y legales, especialmente en contextos como el costarricense, donde el acceso y aprovechamiento de la biodiversidad están regulados por la Ley de Conservación de la Vida Silvestre (N.º 7317), la Ley de Biodiversidad (N.º 7788) y las directrices del SINAC [37], que requieren permisos específicos para recolectar y estudiar

especies silvestres. En consecuencia, si bien los venenos de arañas representan una fuente prometedora para el desarrollo de fármacos innovadores, su investigación y aplicación deben desarrollarse de manera responsable, interdisciplinaria y bajo principios de sostenibilidad, legalidad y bioética.

Agradecimientos

Las personas autoras dan las gracias a Dra. Carolina Centeno Cerdas por su revisión del documento y observaciones sobre el mismo.

Referencias

- [1] J. P. Gómez-Cardona y C. Gómez-Cabal, "Arañas de importancia clínica-epidemiológica en Colombia," *Biosalud*, vol. 18, no. 1, pp. 108-109, 2019.
- [2] O. F. Aidoo, J. Osei-Owusu, K. Asante, A. K. Dofuor, B. O. Boateng, S. K. Debrah, K. D. Ninsin, S. A. Siddiqui, y S. Y. Chia, "Insects as food and medicine: a sustainable solution for global health and environmental challenges," *Frontiers in Nutrition*, vol. 10, pp. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1113219>.
- [3] V. Herzig, "Arthropod assassins: Crawling biochemists with diverse toxin pharmacopeias," *Toxicon*, vol. 158, pp. 33-37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2018.11.312>.
- [4] T. Lüdecke, V. Herzig, B. M. Von Reumont, y A. Vilcinskas, "The biology and evolution of spider venoms," *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 97, no. 1, pp. 163-178, 2021. <https://doi.org/10.1111/brv.12793>.
- [5] R. Guo, G. Guo, A. Wang, G. Xu, R. Lai, y H. Jin, "Spider-Venom Peptides: Structure, Bioactivity, Strategy, and Research Applications," *Molecules*, vol. 29, no. 1, p. 35, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules29010035>.
- [6] P. Escoubas, S. Diochot, y G. Corzo, "Structure and pharmacology of spider venom neurotoxins," *Biochimie*, vol. 82, no. 9-10, pp. 893-907, 2000. [https://doi.org/10.1016/s0300-9084\(00\)01166-4](https://doi.org/10.1016/s0300-9084(00)01166-4).
- [7] C. Nunes, N. K. P. Nunes, F. Nunes, T. O. Vieira, A. X. M. Mariano, y M. Elena, "From the PnTx2-6 Toxin to the PnPP-19 Engineered Peptide: Therapeutic Potential in Erectile Dysfunction, Nociception, and Glaucoma," *Frontiers in Molecular Biosciences*, vol. 9, p. 831823, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmbo.2022.831823>.
- [8] G. F. King, "Venoms as a platform for human drugs: translating toxins into therapeutics," *Expert Opinion on Biological Therapy*, vol. 11, no. 11, pp. 1469-1484, 2011. <https://doi.org/10.1517/14712598.2011.621940>.
- [9] A. F. Lacerda, P. B. Pelegrini, D. M. De Oliveira, É. a. R. Vasconcelos, y M. F. Grossi-De-Sá, "Anti-parasitic Peptides from Arthropods and their Application in Drug Therapy," *Frontiers in Microbiology*, vol. 7, p. 91, 2016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00091>.
- [10] A. A. Baranova, Y. V. Zakalyukina, A. A. Ovcharenko, V. A. Korshun, y A. P. Tyurin, "Antibiotics from Insect-Associated Actinobacteria," *Biology*, vol. 11, no. 11, p. 1676, 2022. <https://doi.org/10.3390/biology11111676>.
- [11] M. V. Micieli, A. Maciá y A. González, "Orden Araneae," en *Entomología médica y veterinaria: Biología y sistématica de artrópodos de interés médico y veterinario en Argentina*, 2023, pp. 140-149. [En línea]. Disponible en: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/156059>
- [12] F. F. Fernandes, J. R. Moraes, J. L. D. Santos, T. G. Soares, V. J. P. Gouveia, A. C. Matavel, y M. H. Borges, "Comparative venomic profiles of three spiders of the genus Phoneutria," *Journal of Venomous Animals and Toxins including Tropical Diseases*, vol. 28, no. e20210042, pp. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.1590/1678-9199-JVATID-2021-0042>
- [13] M. E. de Lima, S. G. Figueiredo, A. Matavel, K. P. Nunes, C. N. da Silva, F. De Marco Almeida, M. R. V. Diniz, M. N. do Cordeiro, M. Stankiewicz, y P. S. L. Beirão, "Phoneutria nigriventer Venom and Toxins: A Review," en *Spider Venoms*, P. Gopalakrishnakone, G. A. Corzo, M. E. de Lima y E. D. García, Eds. Springer, 2016, pp. 71-99. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-6389-0_6
- [14] G. B. Brock, W. J. G. Hellstrom, A. Giraldi, and S. Honig, "Addressing unmet needs for patients with erectile dysfunction: a narrative review of topical therapies," *PubMed*, vol. 13, no. 2, p. qfaf021, Apr. 2025. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1093/sexmed/qfaf021>
- [15] C. Lopera Londoño, J. Vásquez Escobar, D. M. Benjumea Gutiérrez y G. D. Pardo Montaguth, *Arañas de Colombia: Biología, envenenamiento y potenciales usos terapéuticos de su veneno*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, Grupo de Investigación Toxinología, Alternativas Terapéuticas y Alimentarias, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/19232>

- [16] B. Rivas, E. Sada, R. Hernández-Pando, and V. Tsutsumi, "Péptidos antimicrobianos en la inmunidad innata de enfermedades infecciosas," *Salud Pública de México*, vol. 48, no. 1, pp. 62–71, 2006. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342006000100010&lng=es&tlng=es.
- [17] M. K. Shin, I.-W. Hwang, Y. Kim, S. T. Kim, W. Jang, S. Lee, W. Y. Bang, C.-H. Bae, and J.-S. Sung, "Antibacterial and anti-inflammatory effects of novel peptide toxin from the spider *Pardosa astrigera*," *Antibiotics*, vol. 9, no. 7, p. 422, 2020. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9070422>
- [18] H. Tan, J. Wang, Y. Song, S. Liu, Z. Lu, H. Luo, and X. Tang, "Análisis del potencial antibacteriano de nuevos péptidos de hélice α en la araña lobo china *Lycosa sinensis*," *Pharmaceutics*, vol. 14, no. 11, p. 2540, 2022. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112540>.
- [19] J. H. Oh, J. Park, and Y. Park, "Anti-biofilm and anti-inflammatory effects of Lycosin-II isolated from spiders against multi-drug-resistant bacteria," *Biochimica Et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, vol. 1864, no. 1, p. 183769, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2021.183769>
- [20] S. M. Mumtaz, M. A. Khan, A. Jamal, S. H. Hattiwale, and S. Parvez, "Toxin-derived peptides: An unconventional approach to alleviating cerebral stroke burden and neurobehavioral impairments," *Life Sciences*, vol. 351, p. 122777, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122777>
- [21] A. C. N. Souza, N. S. Binda, H. Y. Almeida, C. J. De Castro Júnior, M. V. Gomez, F. M. Ribeiro, and J. F. Da Silva, "Ion channels-related neuroprotection and analgesia mediated by spider venom peptides," *Current Protein and Peptide Science*, vol. 24, no. 5, pp. 365–379, 2023. <https://doi.org/10.2174/1389203724666230328133102>
- [22] M. Mazzuca, C. Heurteaux, A. Alloui, S. Diochot, A. Baron, N. Voirley, N. Blondeau, P. Escoubas, A. Gélot, A. Cupo, A. Zimmer, A. M. Zimmer, A. Eschaliere, and M. Lazdunski, "A tarantula peptide against pain via ASIC1a channels and opioid mechanisms," *Nature Neuroscience*, vol. 10, no. 8, pp. 943–945, 2007. <https://doi.org/10.1038/nn1940>
- [23] A. Dibas, C. Millar, A. Al-Farra, and T. Yorio, "Neuroprotective Effects of Psalmotoxin-1, an Acid-Sensing Ion Channel (ASIC) Inhibitor, in Ischemia Reperfusion in Mouse Eyes," *Current Eye Research*, vol. 43, no. 7, pp. 921–933, 2018. <https://doi.org/10.1080/02713683.2018.1454478>
- [24] B. Cristofori-Armstrong and L. D. Rash, "Acid-sensing ion channel (ASIC) structure and function: Insights from spider, snake and sea anemone venoms," *Neuropharmacology*, vol. 127, pp. 173–184, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.neuropharm.2017.04.042>
- [25] P. Silva, S. Daffre, y P. Bulet, "Isolation and characterization of gomesin, an 18-residue cysteine-rich defense peptide from the spider *Acanthoscurria gomesiana* hemocytes with sequence similarities to horseshoe crab antimicrobial peptides of the Tachyplein family," *The Journal of Biological Chemistry*, vol. 275, no. 43, pp. 33464–33470, 2000, doi: 10.1074/jbc.M001491200.
- [26] N. J. Saez y V. Herzig, "Versatile spider venom peptides and their medical and agricultural applications," *Toxicon*, vol. 158, pp. 109–126, 2018, doi: 10.1016/j.toxicon.2018.11.298.
- [27] S. A. Koskela y C. R. Figueiredo, "From antimicrobial to anticancer: the pioneering works of Prof. Luiz Rodolpho Travassos on bioactive peptides," *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 54, no. 4, pp. 2561–2570, 2023, doi: 10.1007/s42770-023-01118-8.
- [28] J. D. Tanner, E. Deplazes, y R. L. Mancera, "The biological and biophysical properties of the spider peptide gomesin," *Molecules*, vol. 23, no. 7, pp. 1733, 2018, doi: 10.3390/molecules23071733.
- [29] M. A. Fernandez-Rojo *et al.*, "Gomesin peptides prevent proliferation and lead to the cell death of devil facial tumour disease cells," *Cell Death Discovery*, vol. 4, no. 19, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1038/s41420-018-0030-0.
- [30] R. C. Soletti *et al.*, "Peptide gomesin triggers cell death through L-type channel calcium influx, MAPK/ERK, PKC and PI3K signaling and generation of reactive oxygen species," *Chemico-Biological Interactions*, vol. 186, no. 2, pp. 135–143, 2010, doi: 10.1016/j.cbi.2010.04.012.
- [31] A. Machado, M. A. Fázio, A. Miranda, S. Daffre, y M. T. Machini, "Synthesis and properties of cyclic gomesin and analogues," *Journal of Peptide Science*, vol. 18, no. 9, pp. 588–598, 2012, doi: 10.1002/psc.2439.
- [32] S. T. Henriques *et al.*, "Redesigned spider peptide with improved antimicrobial and anticancer properties," *ACS Chemical Biology*, vol. 12, no. 9, pp. 2324–2334, 2017, doi: 10.1021/acschembio.7b00459.
- [33] L. Y. Chan *et al.*, "Cyclization of the antimicrobial peptide gomesin with native chemical ligation: influences on stability and bioactivity," *ChemBioChem*, vol. 14, no. 5, pp. 617–624, 2013, doi: 10.1002/cbic.201300034.
- [34] A. H. Benfield *et al.*, "Cyclic gomesin, a stable redesigned spider peptide able to enter cancer cells," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, vol. 1863, no. 1, p. 183480, 2020, doi: 10.1016/j.bbamem.2020.183480.

- [35] X. Liu, S. T. Henriques, D. J. Craik, y L. Y. Chan, “Unlocking the potential of the antimicrobial peptide gomesin: From discovery and structure–activity relationships to therapeutic applications,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 6, p. 5893, 2023, doi: 10.3390/ijms24065893.
- [36] E. G. Rodrigues *et al.*, “Effective topical treatment of subcutaneous murine B16F10-Nex2 melanoma by the antimicrobial peptide gomesin,” *Neoplasia*, vol. 10, no. 1, pp. 61–68, 2008, doi: 10.1593/neo.07885.
- [37] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, “Ley de Conservación de la Vida Silvestre, Ley N° 7317,” *La Gaceta*, N° 109, 8 de junio de 1992.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión de redacción, 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..

La disfunción de la Autofagia en la enfermedad del Alzheimer: Bioquímica y futuro terapéutico

Autophagy dysfunction in Alzheimer's disease: Biochemistry and therapeutic future

Ariana Serrano-Monge¹, Daniel Álvarez-Brenes², Isaac Calderón-Blanco³, Sofía Jiménez-Murillo⁴, Raquel Montoya-Mata⁵

Fecha de recepción: 15 de noviembre, 2024

Fecha de aprobación: 3 de marzo, 2025

Serrano-Monge, A; Álvarez-Brenes, D; Calderón-Blanco, I; Jiménez-Murillo, S; Montoya-Mata, R. La disfunción de la autofagia en la enfermedad del alzheimer: bioquímica y futuro terapéutico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 54-65.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7589>

1 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

 aserrano@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0009-3164-3707>

2 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

 d.alvarez@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0002-9574-4813>

3 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

 iscalderon@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0003-1594-7010>

4 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

 sofijimenez@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0009-5562-5562>

5 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

 ramontoya@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0009-0008-9150-9641>



Palabras clave

Neuronas; enfermedad de Alzheimer; β -amiloide; autofagosomas; LC3.

Resumen

La Enfermedad de Alzheimer (AD), la cual es la principal causa de demencia, está caracterizada por la acumulación de β -amiloide y ovillos neurofibrilares, que causan deterioro cognitivo. En América Latina y el Caribe, la AD representa entre el 50% y el 84% de los casos de demencia, con proyecciones que indican un aumento a 13.7 millones de casos para 2050. El proceso de la autofagia celular, un proceso vital que mantiene la homeostasis al degradar células dañadas, es esencial para la salud neuronal. La disfunción de la autofagia se relaciona con la acumulación de proteínas mal plegadas en la AD. A pesar de que la autofagia se activa inicialmente como respuesta protectora frente a β -amiloide, su acumulación bloquea la degradación lisosómica, lo que resulta en la formación de oligómeros neurotóxicos y placas amiloideas, causando inflamación y daño neuronal. Alteraciones en proteínas clave como Beclin 1, PICALM y PSEN-1 agravan la acumulación de A β , afectando la producción de ATP y contribuyendo a la neurodegeneración. La eficacia de los tratamientos actuales sigue siendo objeto de debate en la comunidad científica debido a las limitaciones que estos presentan, incluyendo la dificultad de replicación de la enfermedad humana en modelos animales, la penetración insuficiente en el sistema nervioso central de los tratamientos y sus posibles efectos adversos. De esta forma, su futuro terapéutico se enfoca principalmente en ampliar los ensayos clínicos estudiando distintas rutas patológicas y enfocándose en biomarcadores para la detección temprana de la enfermedad.

Keywords

Neurons; Alzheimer's disease; β -amyloid; autophagosomes; LC3.

Abstract

Alzheimer's Disease (AD), which is the leading cause of dementia, is characterized by the accumulation of β -amyloid and neurofibrillary tangles, which cause cognitive impairment. In Latin America and the Caribbean, AD represents between 50% and 84% of dementia cases, with projections indicating an increase to 13.7 million cases by 2050. The process of cellular autophagy, a vital process that maintains homeostasis by degrading damaged cells, is essential for neuronal health. Autophagy dysfunction is related to the accumulation of misfolded proteins in AD. Although autophagy is initially activated as a protective response against β -amyloid, its accumulation blocks lysosomal degradation, resulting in the formation of neurotoxic oligomers and amyloid plaques, causing inflammation and neuronal damage. Alterations in key proteins such as Beclin 1, PICALM and PSEN-1 aggravate A β accumulation, affecting ATP production and contributing to neurodegeneration. The effectiveness of current treatments remains a subject of debate within the scientific community due to their limitations, including the difficulty in replicating the human disease in animal models, insufficient penetration into the central nervous system, and potential adverse effects. Therefore, its therapeutic future focuses primarily on expanding clinical trials by studying different pathological pathways and targeting biomarkers for early disease detection.

Introducción

La enfermedad del Alzheimer (AD, por sus siglas en inglés) hace referencia a un trastorno neurodegenerativo relacionado con la edad y es la causa más común de demencia humana. Su primera descripción se realizó en 1906 y desde entonces se ha investigado ampliamente, no obstante, la base molecular de su patogénesis aún no se comprende con precisión ni existen intervenciones efectivas para detener o revertir su progresión [1, 2].

Se cree que esta enfermedad es la consecuencia de factores como la edad, antecedentes familiares, antecedentes genéticos y lesiones cerebrales. De acuerdo con la edad de inicio, la enfermedad se divide en dos tipos: AD de inicio temprano (antes de los 65 años) y AD de inicio tardío (a los 65 años o después). La AD de inicio temprano es más agresivo, pero representa solo el 3% de todos los casos. Muchos casos de este tipo de AD están vinculados a mutaciones patogénicas en los genes APP, PSEN1 y PSEN2 que se heredan de manera autosómica dominante. Por otro lado, la AD de inicio tardío representa más del 90% de los casos. El APOE ε4 es considerado el gen de mayor riesgo para este tipo de AD, pero se han reportado otros genes de riesgo como el ADAM10, PICALM, TREM2, CLU, SORL1, CR1, BIN1, CD33, entre otros [2].

La autofagia hace referencia a la degradación mediada por lisosomas de los componentes citoplasmáticos. Este proceso ejerce un rol muy importante en el mantenimiento de la homeostasis celular. En los últimos años, se ha evidenciado que la disfunción de la autofagia presenta una estrecha relación con la patogénesis de la AD. Por este motivo, la modulación de la autofagia ha ganado atención como un enfoque prometedor para tratar el desarrollo patológico de la AD [3].

La Enfermedad de Alzheimer

Incidencia y prevalencia en América Latina y el Caribe (ALC)

El Alzheimer es la causa más común de demencia en América Latina y el Caribe, representando entre el 50% y el 84% de los casos. En esta región, la prevalencia e incidencia de la demencia han mostrado un aumento significativo en los últimos años [4]. De acuerdo con una publicación de la Pan American Health Organization, en América Latina y el Caribe se identificó veinticuatro estudios poblacionales sobre la prevalencia de demencia mediante una revisión sistemática en 2023. De estos estudios, se obtuvo que la prevalencia combinada de las personas con 80 años de edad o mayores fue del 23%, mientras que en aquellas con 90 años o más, fue del 39% [5]. Por otra parte, las estimaciones totales para la región evidencian una incidencia que varía de 0.96 a 1.4 casos nuevos cada minuto [5]. Además, se proyectó que el número de personas con demencia será de 13.7 millones para el año 2050, lo que equivale a un aumento del 205% en comparación con el año 2019 y se debe principalmente al envejecimiento de la población [5].

Neuropatología y etiología de la enfermedad

Una neurona es una célula eléctricamente excitable que recibe y envía información que permite la comunicación dentro del cuerpo. La neurona se puede dividir en tres partes básicas: las dendritas, que reciben información entrante, el soma o cuerpo celular, que es la porción biosintética de la célula que integra la información entrante, y por último, el axón, que envía un impulso eléctrico desde el cuerpo celular a las terminales del axón para comunicarse con otras células [6].

Las neuronas tienen características especiales que no se encuentran en otras células, como por ejemplo los cuerpos de Nissl, visibles en el cuerpo celular bajo el microscopio, estos le dan al citoplasma un aspecto granular y están compuestos por ribosomas y retículo endoplasmático rugoso, lo que permite la producción de grandes cantidades de proteínas [6].

La AD se relaciona con la acumulación de β -amiloide ($A\beta$) y ovillos neurofibrilares (NFTs) en el cerebro. Primero, estos acúmulos inician su proceso de formación en zonas en la neocorteza basal, temporal y orbitofrontal del cerebro. Conforme avanza la enfermedad, estos se extienden por toda la neocorteza/ a lo largo de la neocorteza, el hipocampo, la amígdala, el diencéfalo y los ganglios basales y, en casos críticos, se pueden expandir hasta el mesencéfalo, el tronco cerebral inferior y la corteza cerebelosa [7].

La β -amiloide se trata de péptidos generados a partir de la ruptura proteolítica de la APP (proteína precursora amiloidea) por medio de la enzima BACE-1 y el complejo γ -secretasa-PSEN-1. Asimismo, los genes que codifican para APP pueden sufrir mutaciones, aumentando su producción o la de sus formas neurotóxicas [8]. Los depósitos de β -amiloide a nivel extracelular forman placas seniles y oligómeros solubles que pueden dispersarse por el cerebro. $A\beta$ ejerce un rol importante en la neurotoxicidad y la función neural, por lo tanto, la acumulación de estas placas puede causar la estimulación de astrocitos y microglía, daño a los axones, dendritas, pérdida de sinapsis y deterioro cognitivo [9].

Por su parte, los ovillos neurofibrilares intracitoplasmáticos son agregados filamentosos insolubles que se producen cuando la proteína tau (T) se hiperfosforila por acción de quinasas que se activan cuando se polimerizan las fibrillas de amiloide [8, 7]. Tau es una proteína asociada a los microtúbulos, que se genera por *splicing* alternativo de ARNm a partir del gen MAPT en el cromosoma 17. Los NFTs son capaces de enrollarse entre sí y formar filamentos helicoidales pareados que se acumulan en el citoplasma de las neuronas, axones y dendritas, lo que lleva a la pérdida de microtúbulos del citoesqueleto y de proteínas asociadas a la tubulina [9].

El daño sináptico ocurre antes de la pérdida neuronal, lo que respalda la idea de que el fallo sináptico es una etapa trascendental en la patogénesis de la enfermedad [10]. El daño sináptico ocurre en la neocorteza y el sistema límbico debido a defectos en el transporte axonal, daño mitocondrial, estrés oxidativo y la acumulación de β -amiloide y tau en los sitios sinápticos [9]. Este daño se observa en una etapa temprana de la enfermedad y se reconoce como la principal causa de las alteraciones cognitivas [11].

Mecanismo de la Autofagia

La autofagia es un proceso celular que actúa como mecanismo de respuesta ante estrés para garantizar la supervivencia de células eucariotas y mantener la homeostasis y el equilibrio del metabolismo celular. En este proceso las células degradan componentes citoplasmáticos como proteínas anormales y orgánulos dañados por medio de los lisosomas, desencadena la formación de autofagosomas y el reciclaje de nutrientes [12, 13, 14]. El mecanismo del proceso autofágico se basa en la macroautofagia, la autofagia mediada por chaperonas y la microautofagia [12, 14].

La macroautofagia es un proceso metabólico que induce la degradación de vesículas conteniendo proteínas y orgánulos, que son envueltos por membranas bicapa de las células, a través de enzimas con capacidad de hidrolización, formando así autofagosomas. Los autofagolisosomas surgen por la unión de la membrana externa que cubre el material formado con proteínas y orgánulos, con la membrana lisosomal [12, 14, 15]. La formación de autofagosomas requiere de genes relacionados con la autofagia (ATGs), los cuales codifican para proteínas esenciales en el proceso de la autofagia. Entre dichas proteínas de mayor importancia se debe mencionar el complejo ULK y las vesículas ATG9, las cuales son capaces

de trasladarse hacia una zona cercana o directamente en el retículo endoplasmático (RE), donde se da la formación de los autofagosomas. El complejo ULK se conforma de ATG101, ATG13, FIP200 Y ULK1/2 propiamente con funciones relacionadas con la nucleación de la membrana de aislamiento o [12, 15]. Ambos grupos reclutan al complejo PtdIns3K para formar PtdIns3P y generar las membranas de aislamiento junto con otras proteínas como ATG2A/B y WIPI2 y proteínas provenientes del RE [12, 15]. La proteína ATG8/LC3 influye en el crecimiento y maduración de los autofagosomas y está involucrada en la unión del lisosoma [12, 15].

La autofagia mediada por chaperonas y la microautofagia están involucradas en la entrega de carga lisosomal y su degradación posterior. La diferencia se encuentra en su mecanismo de entrega, la autofagia mediada por chaperonas promueve la entrega y eliminación de lisosomas del conjunto de proteínas de la secuencia KFERQ (secuencia de aminoácidos Lys-Phe-Glu-Arg-Gln). Por otro lado, la microautofagia surge por la formación de pliegues, o bien invaginaciones tanto en la membrana lisosomal como endosómica, que ocasionan la digestión de sustratos [14].

Importancia Bioquímica del proceso

A nivel bioquímico, la autofagia es de suma importancia al influir en la estabilidad de los procesos metabólicos de la célula y de la energía preservada. La autofagia actúa como mecanismo de protección del ADN al evitar anomalías genómicas que pueden presentarse por mal plegamiento de proteínas y por orgánulos dañados. La autofagia también reduce los impactos negativos que pueden presentarse en diversos órganos al evitar anomalías en mitocondrias dañadas que pueden llegar a afectar el corazón como órgano de gran importancia en la regulación de energía para la actividad cardíaca [12, 13, 16]. La autofagia provoca respuestas de defensa en las células en situaciones de estrés, lo cual permite su preservación y previene la formación de posibles tumores. Este proceso activa el reciclaje de lípidos, aminoácidos y de fuentes de glucosa para contrarrestar señales de descompensación energética. De esta forma se induce la síntesis de ATP en múltiples rutas metabólicas a través de los componentes reciclados producto del proceso autofágico. También se incluye el papel desencadenado por los autofagosomas y su relación con la actividad neuronal, la formación de autofagosomas ayuda en la eliminación de acumulados de proteínas con mutaciones no deseadas mediante su digestión completa [14].

Las Células Nerviosas y su Proceso de Autofagia.

En los últimos años, la autofagia ha emergido como un campo de estudio relevante, especialmente en el contexto de las enfermedades del sistema nervioso. Las neuronas son particularmente vulnerables a diversas agresiones tanto internas como externas, tales como la isquemia/reperfusión (I/R), la inflamación, la crisis energética, los trastornos metabólicos y el estrés oxidativo, entre otros [17]. Ante estas condiciones de estrés, la autofagia puede activarse en distintos grados. La autofagia moderada, en particular, juega un papel esencial en el mantenimiento de la homeostasis neuronal, permitiendo la eliminación de agregados proteicos y orgánulos dañados, al tiempo que recicla componentes celulares como ácidos grasos, aminoácidos y ácidos nucleicos [17]. Por tanto, se reconoce que la autofagia leve a moderada es un mecanismo crucial para la supervivencia de las neuronas y para la preservación del equilibrio en el sistema nervioso central.

Las proteínas ATG7, ATG12, ATG16 y LC3 son fundamentales en la formación de autofagosomas a partir de fagóforos, activadas por el complejo ATG1, Beclin 1 y el complejo de clasificación vacuolar Vps34 [18]. La eliminación de ATG5 y ATG7 en células precursoras neuronales (NPCs) provoca la acumulación de cuerpos de inclusión citoplasmáticos, lo que resulta en neurodegeneración y déficits motores progresivos, destacando la autofagia como un sistema

fundamental para el control de calidad neuronal [19]. Además, estudios en modelos animales han confirmado la relevancia de la autofagia en la proliferación neuronal y el mantenimiento de células madre neuronales en la etapa postnatal. La pérdida de Ambra1, un activador de Beclin1, produce consecuencias graves como defectos en el desarrollo del tubo neural, acumulación de proteínas ubiquitinadas, desequilibrio en la proliferación celular y apoptosis excesiva, reflejando disfunción en la autofagia [19].

Estos cambios en la autofagia neuronal también afectan la homeostasis, facilitando la aparición de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer, Parkinson y Huntington, caracterizadas por acumulación de proteínas mal plegadas, progresión con el envejecimiento y daño neuronal [17]. Dado que las neuronas son células postmitóticas, la reducción de la autofagia con la edad propicia la acumulación de proteínas defectuosas y organelos dañados, estableciendo la autofagia como un mecanismo citoprotector en la prevención de daños neurodegenerativos [17]. En experimentos con ratones donde las proteínas ATG5 o ATG7 fueron eliminadas en neuronas, se observó una disminución en la autofagia basal cerebral, acumulación de proteínas ubiquitinadas, p62 y agregados no degradables, además de pérdida neuronal significativa en el cerebro y corteza cerebelosa. En ausencia de ATG5, los ratones desarrollaron disfunción motora progresiva, destacando la función protectora de la autofagia contra la neurodegeneración [17].

Disfunción de la autofagia en la Enfermedad de Alzheimer.

Inicialmente, A β induce la generación de ROS, que a su vez activan la autofagia a través de la quinasa PI3 tipo III. Esta activación temprana de la autofagia parece ser una respuesta protectora contra el daño mitocondrial causado por A β . Sin embargo, conforme la enfermedad progresó, se produce un bloqueo en la degradación lisosómica, impidiendo la eliminación efectiva de los desechos celulares. Este fenómeno lleva a la acumulación ya mencionada de mitocondrias envejecidas, y de proteínas mal plegadas, especialmente en las terminales sinápticas y los procesos neuríticos [20]. En individuos sanos, la mayoría de los péptidos A β son de la forma A β 40 (no propensa a la agregación), mientras que A β 42, que es más propenso a la agregación, está en menor cantidad. En la AD, un desequilibrio entre la producción y la degradación de A β 42 provoca su acumulación y la formación de las fibrillas amiloideas. Si bien esta respuesta está destinada a limpiar los agregados amiloideos, resulta en el daño colateral a las neuronas, contribuyendo a la neurodegeneración. [21] Por otro lado, la presencia de NFTs está correlacionada con el grado de severidad de la enfermedad, ya que su número aumenta conforme progresó la enfermedad [22].

Además, la disfunción de la autofagia está relacionada con otras alteraciones en varias proteínas clave, como Beclin 1, PICALM y Presenilina-1 (PSEN-1). Beclin 1, que juega un papel esencial en las primeras etapas de la autofagia, se encuentra disminuida en las zonas afectadas del cerebro de pacientes con AD leve; esta reducción impide la correcta degradación de componentes intracelulares, lo que provoca la acumulación de A β y mitocondrias dañadas [23]. Por su parte, PICALM, implicada en la fusión de autofagosomas con lisosomas, se encuentra recortada, lo que reduce el flujo autofágico y causa su agrupación [24]. La PSEN-1 es encargada de la acidificación de los lisosomas, también se encuentra afectada, lo que impide la degradación adecuada del contenido de los autofagosomas fusionados; como resultado a largo plazo, se liberan enzimas lisosomales dañinas en el citoplasma, activando procesos de muerte celular. Además, PSEN-1 está asociada con la regulación de la homeostasis del calcio en el RE, y su alteración contribuye a la estimulación, la agregación de A β y afecta diversas vías de señalización celular [25]. Ahora bien, uno de los principales efectos de la acumulación de A β es el fallo mitocondrial. Conjuntamente, A β también inhibe la función de varias enzimas mitocondriales, como el complejo IV (*citocromo c oxidasa*), lo que interfiere con la fosforilación

oxidativa y afecta negativamente la producción de ATP. El estrés oxidativo causado por A β se agrava por su capacidad para modificar el potencial de membrana mitocondrial y del RE, lo que permite la entrada excesiva de iones como el calcio y el hierro [20].

El fallo sináptico es otra de las consecuencias graves de la acumulación proteica en la AD. En fases tempranas, la pérdida sináptica afecta principalmente al hipocampo, una región clave para el aprendizaje y la memoria. La sinaptofisina, una proteína clave en la liberación de neurotransmisores, es disminuida y afecta la transmisión sináptica. Los oligómeros de A β adicionalmente alteran los receptores postsinápticos, como NMDAr y AMPAr, responsables de la transmisión de glutamato y GABA. Asimismo, bloquean receptores esenciales, como los receptores de neurotrofinas trkB y p75NTr, el receptor de acetilcolina nicotínica nAChr, y el canal de calcio VGCC. Esta alteración bloquea el procesamiento cognitivo, causando neurodegeneración, pero no necesariamente la muerte neuronal inmediata [26].

El Futuro del Alzheimer: Papel de la Autofagia en su Estudio

La autofagia está regulada por diversas vías de señalización, incluida la vía de mTOR, cuyo tratamiento con Rapamycin ha demostrado ser efectivo [27]. En el contexto de la AD, la activación de mTOR puede inhibir la autofagia, lo que podría favorecer la acumulación de las proteínas dañinas mencionadas. Inhibir mTOR ha demostrado aumentar la actividad autofágica y reducir la acumulación de proteínas tóxicas en modelos experimentales [28, 29], aunque estos resultados aún son preliminares.

Asimismo, la autofagia se está estudiando como un posible biomarcador para la AD [30]. Algunos indicadores de la actividad autofágica pueden correlacionarse con la progresión de la enfermedad, lo que podría facilitar su diagnóstico y monitoreo. Las investigaciones actuales de la AD están explorando estrategias para modular la autofagia [31], como el uso de fármacos, intervenciones dietéticas y ejercicio, con la esperanza de encontrar nuevas formas de prevenir o tratar la enfermedad. Entre los medicamentos aprobados para abordar el avance de la enfermedad se encuentran los inhibidores de la acetilcolinesterasa, que alivian temporalmente los síntomas cognitivos, y los antagonistas del receptor NMDA (Memantina), que regulan la actividad del glutamato, un neurotransmisor [32]. Además, se han desarrollado anticuerpos monoclonales dirigidos a las placas de A β en el cerebro, diseñados para reducir la carga de esta proteína y frenar la progresión de la enfermedad [33]. Como se mencionó anteriormente, la alta concentración de estas proteínas está asociada con la AD, especialmente cuando el proceso de autofagia es deficiente. Sin embargo, la eficacia de estos tratamientos ha sido objeto de debate y controversia en la comunidad científica.

LC3 como marcador molecular del flujo autofágico: Transición y métodos de detección

En el contexto de la biología molecular, la proteína LC3 (*Microtubule-associated protein 1A/1B-light chain 3*) es ampliamente reconocida como un marcador molecular clave para evaluar el flujo autofágico [34]. Durante este proceso, LC3 se transforma entre dos formas específicas: LC3-I, una forma citosólica y no lipídica, y LC3-II, la cual surge tras la conjugación de LC3-I con fosfatidiletanolamina (cefalina). Este paso es fundamental, ya que LC3-II es la única forma que se asocia con las membranas de los autofagosomas, permitiendo que actúe como un marcador específico de estas vesículas autofágicas [34, 35].

La transición de LC3-I a LC3-II es un indicador directo de la formación de autofagosomas y, por lo tanto, del inicio del flujo autofágico. LC3-I es inicialmente procesada en su extremo carboxilo por la proteasa Atg4, lo que permite su conjugación a la cefalina y su integración en

las membranas interna y externa del autofagosoma en forma de LC3-II [35]. Una vez que el autofagosoma se fusiona con el lisosoma para formar un autolisosoma, LC3-II es degradada por las proteasas lisosomales [34].

Este proceso de lipidación y anclaje membranal convierte a LC3-II en un marcador efectivo y ampliamente utilizado para detectar el flujo autofágico. Además, la degradación de LC3-II sirve como un indicador de la culminación del proceso y proporciona una medida cuantitativa de la actividad autofágica [34]. En la monitorización de la conversión de LC3 en sus dos formas, se emplean métodos como inmunotransferencia (*Western Blot*) y análisis de inmunofluorescencia. Este último método permite visualizar en tiempo real el cambio de LC3-I a la forma LC3-II [35]. Para una cuantificación más precisa, se utiliza a menudo la variante GFP-LC3, que permite marcar y observar los autofagosomas en células vivas [34].

Tratamientos contemporáneos y terapias génicas.

Las terapias génicas están emergiendo como una estrategia de investigación para la AD, especialmente en la modulación de la autofagia neuronal. Estas terapias buscan introducir o modificar genes que pueden promover la producción de proteínas neuroprotectoras, como el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF por sus siglas en inglés), que no solo favorece la supervivencia neuronal, sino que también estimula la actividad autofágica [36]. Aumentar la expresión de BDNF puede mejorar la capacidad de las neuronas para eliminar proteínas mal plegadas [36] como las previas mencionadas que se acumulan en el cerebro de los pacientes con AD. De esta manera, la activación de la autofagia mediante terapias génicas podría contribuir a la reducción de la carga proteica tóxica y mejorar la función cognitiva.

Por otro lado, las terapias basadas en ARN, como los ARN de interferencia (RNAi), se están investigando para silenciar genes responsables de la producción de proteínas dañinas en la AD [37]. Al reducir su síntesis, estas terapias no solo abordan la causa subyacente de la enfermedad, sino que también facilitan la autofagia, permitiendo que las neuronas eliminen más eficientemente las proteínas tóxicas. Sin embargo, uno de los desafíos persistentes es la entrega efectiva de estos tratamientos al cerebro, dada la barrera hematoencefálica. La investigación continúa explorando métodos innovadores de administración, como nanopartículas y vectores virales [37], que pueden ayudar a llevar estas terapias a las neuronas, potenciando así la autofagia y ofreciendo nuevas esperanzas para el tratamiento de la AD.

Conclusiones

Con respecto a la AD, se enfatiza la necesidad de evitar la producción de ROS, que desencadenan el estrés oxidativo en las neuronas, promoviendo la acumulación del péptido A β y los NFTs. Además, en el ámbito de la bioquímica clínica, se propone la invención de marcadores moleculares que puedan relacionarse con la autofagia (como LC3) y el nivel de estrés oxidativo. Estos marcadores permitirían el diseño de pruebas diagnósticas no invasivas como exámenes de sangre o de orina, en los que se puedan determinar estos factores y establecer una relación directa entre ellos. El fundamento principal es buscar la similitud práctica a las pruebas ya existentes, como las pruebas de función renal, y estandarizar los valores y su interacción, como lo demuestra el índice de Castelli. La implementación de este enfoque permitiría la detección temprana de la AD, con la posibilidad de ser elegibles para el sometimiento a tratamientos y terapias génicas ya existentes. Finalmente, la aplicación de esta estrategia, junto con la medicina regenerativa y la biotecnología médica, podrían impulsar el desarrollo de una cura efectiva y segura.

Limitaciones

Varios factores metodológicos restringen la interpretación de los estudios actuales. Gran parte de la evidencia proviene de modelos animales transgénicos de Alzheimer, como ratones con APP, PSEN u otras mutaciones. Estos modelos reproducen aspectos aislados (por ejemplo, placas amiloides) pero no replican la complejidad de la enfermedad humana, especialmente en sus formas esporádicas y fases iniciales. De hecho, muchos modelos pasan por alto características patológicas tempranas del Alzheimer, lo que limita su validez [38]. Adicionalmente, medir la autofagia *in vivo* es técnicamente complejo, los ensayos en tejido cerebral suelen cuantificar proteínas (LC3-II, p62, entre otros.) o puntaje de autofagosomas, pero estos marcadores pueden interpretarse de forma ambigua. Por ejemplo, un incremento de LC3 puede deberse tanto a inducción de autofagia como a bloqueo de la fusión lisosomal [39].

Desde la perspectiva clínica, las limitaciones son notables. Existe una brecha entre los hallazgos preclínicos y los resultados en pacientes, ya que pocos fármacos moduladores de autofagia han llegado a ensayos clínicos en Alzheimer. Hasta la fecha, ningún ensayo clínico ha completado la evaluación de rapamicina en pacientes con AD. La penetración insuficiente de muchas moléculas al sistema nervioso central supone otro obstáculo, por ejemplo, los inhibidores de mTOR de primera y segunda generación, eficaces en tejidos periféricos, apenas atraviesan la barrera hematoencefálica [40]. A esto se suma la ausencia de biomarcadores de autofagia validados en humanos, ya que actualmente, no se dispone de trazadores de imagen o marcadores en LCR/tejido que reflejen fielmente la actividad autofágica cerebral [41].

Las estrategias terapéuticas actuales también presentan sus propios obstáculos. Las aproximaciones génicas o basadas en ARN (por ejemplo, sobreexpresión de proteínas clave como Beclin-1 o uso de *antisense* oligonucleótidos) enfrentan retos de entrega selectiva al cerebro y riesgos de efectos off-target [41]. Por otro lado, los anticuerpos monoclonales anti-amiloide (como aducanumab o lecanemab) han mostrado capacidad para reducir placas β -amiloides, pero sus beneficios cognitivos son modestos y van acompañados de efectos adversos frecuentes, por ejemplo, en estudios de aducanumab, el edema cerebral se presentó en alrededor del 35% de los pacientes tratados [42].

Perspectivas futuras

La prevención de la AD depende en gran medida del progreso en la investigación, particularmente mediante un aumento en la cantidad de ensayos clínicos que evalúen la eficacia de nuevos fármacos, los cuales son clave para lograr su aprobación y extender su aplicabilidad clínica, dado que muchos de los tratamientos actuales presentan un rango de acción limitado. Por ejemplo, es necesario realizar más ensayos clínicos para evaluar la ventaja terapéutica de fármacos emergentes como la aducanumab, la rapamicina, el reseveratol, la curcumina, entre otros, conocidos por su acción en la potenciación de la autofagia [2, 43]. De esta forma, los enfoques prospectivos para el tratamiento de la AD deben abordar el estudio del metabolismo de A β , la proteína tau, los efectos inflamatorios, los receptores de neurotransmisores y la plasticidad sináptica, además de otros abordajes clínicos enfocados en la regulación de vías de señalización del metabolismo, cambios epigenéticos, el sistema vascular, la neurogénesis y la homeostasis proteica [44]. Por otro lado, el incentivo de formas de actividad física es de gran importancia ya que se ha comprobado la depuración de A β por medio de la estimulación de la autofagia en tejido periféricos como el hígado, músculos y cerebro a raíz de la actividad física, además de reducir el deterioro cognitivo mediante la mejora de la plasticidad sináptica [43].

Asimismo, la investigación biomédica a futuro para el tratamiento de la AD debe atender con detalle la relación del metabolismo hepático y la homeostasis cerebral ya que puede conllevar a la neurodegeneración debido a que la alteración de este genera variaciones en la deposición

de A β [2, 43]. Finalmente, futuras investigaciones deben centrarse en identificar biomarcadores sistémicos precisos de la autofagia, distintos a los cerebrales, cuya obtención no es viable en pacientes vivos. En su lugar, se deben priorizar biomarcadores periféricos y hepáticos que favorezcan una detección temprana, considerando los posibles efectos no deseados de intervenir su metabolismo [43].

Referencias

- [1] A. Litwiniuk, G. R. Juszczak, A. M. Stankiewicz, and K. Urbańska, "The role of glial autophagy in Alzheimer's disease," *Molecular Psychiatry*, vol. 28, no. 11, pp. 4528–4539, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41380-023-02242-5>
- [2] Z. Zhang, X. Yang, Y. Q. Song, and J. Tu, "Autophagy in Alzheimer's disease pathogenesis: Therapeutic potential and future perspectives," *Ageing research reviews*, vol. 72, p. 101464, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arr.2021.101464>
- [3] A. Rahman, S. Rahman, H. Rahman, M. Rasheduzzaman, A. N. M Mamun-Or-Rashid, J. Uddin, R. Rahman, H. Hwang, M. G Pang, and H. Rhim, "Modulatory Effects of Autophagy on APP Processing as a Potential Treatment Target for Alzheimer's Disease," *Biomedicines*, vol. 9, no. 1, p. 5, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/biomedicines9010005>
- [4] F. Lopera, N. Custodio, M. Rico-Restrepo, R. F. Allegri, J. D. Barrientos, E. García-Batres, I. L. Calandri, C. Calero-Moscoso, P. Caramelli, J. C. Duran-Quiroz, A. M. Jansen, A. J. Mimenza-Alvarado, R. Nitrini, J. F. Parodi, C. Ramos, A. Slachevsky, and S. M. Dozzi-Brucki, "A task force for diagnosis and treatment of people with Alzheimer's disease in Latin America," *Frontiers in Neurology*, vol. 14, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1198869>
- [5] Pan American Health Organization, "Dementia in Latin America and the Caribbean: Prevalence, Incidence, Impact, and Trends over Time," Washington, DC: PAHO. Accessed: Nov. 9, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37774/9789275126653>
- [6] K. Wiles, C. Wilson, J. M. Ramiro-Díaz, G. Kallifatidis, and S. Mukhopadhyay, "The Neuron," in *Anatomy and Physiology I: An Interactive Histology Atlas*, 2024. [Online]. Available: <https://pressbooks.pub/aandp1histologyatlasandworkbook/chapter/the-neuron/>
- [7] S. Tiwari, V. Atluri, A. Kaushik, A. Yndart, and M. Nair, "Alzheimer's disease: pathogenesis, diagnostics, and therapeutics," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 14, pp. 5541-5554, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.2147/IJN.S200490>
- [8] D. Barragán-Martínez, M. A. García-Soldevilla, A. Parra-Santiago, and J. Tejeiro-Martínez, "Enfermedad de Alzheimer," *Medicine*, vol. 12, no. 74, pp. 4338-4346, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.med.2019.03.012>
- [9] Z. Breijeh and R. Karaman, "Comprehensive Review on Alzheimer's Disease: Causes and Treatment," *Molecules*, vol. 25, no. 24, p. 5789, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25245789>
- [10] S. Meftah and J. Gan, "Alzheimer's disease as a synaptopathy: Evidence for dysfunction of synapses during disease progression," *Frontiers in Synaptic Neuroscience*, vol. 15, p. 1129036, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.3389/fnsyn.2023.1129036>
- [11] M. Wu, M. Zhang, X. Yin, K. Chen, Z. Hu, Q. Zhou, X. Cao, Z. Chen, and D. Liu, "The role of pathological tau in synaptic dysfunction in Alzheimer's diseases," *Translational Neurodegeneration*, vol. 10, no. 45, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s40035-021-00270-1>
- [12] X. Pang, X. Zhang, Y. Jiang, Q. Su, Q. Li, and Z. Li, "Autophagy: Mechanisms and Therapeutic Potential of Flavonoids in Cancer," *Biomolecules*, vol. 11, no. 2, p. 135, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/biom11020135>
- [13] A. S. Gross and M. Graef, "Mechanisms of Autophagy in Metabolic Stress Response," *Journal of Molecular Biology*, vol. 432, no. 1, pp. 28–52, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2019.09.005>
- [14] N. Peker and D. Gozuacik, "Autophagy as a Cellular Stress Response Mechanism in the Nervous System," *Journal of Molecular Biology*, vol. 432, no. 8, pp. 2560–2588, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2020.01.017>
- [15] H. Morishita and N. Mizushima, "Diverse Cellular Roles of Autophagy," *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, vol. 35, no. 1, pp. 453–475, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-100818-125300>
- [16] H. Feng, N. Wang, N. Zhang, and H. Liao, "Alternative autophagy: mechanisms and roles in different diseases," *Cell Commun Signal*, vol. 20, no. 1, p. 43, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1186/s12964-022-00851-1>

- [17] Y. Li, Z. Hong, and R. Sheng, "The Multiple Roles of Autophagy in Neural Function and Diseases," *Neuroscience Bullet*, vol. 40, pp. 363-382, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s12264-023-01120-y>
- [18] N. H. Ali, H. M. Al-kuraishy, A. I. Al-Gareeb, S. A. Alnaaim, A. Alexiou, M. Papadakis, H. M. Saad, and G. E. Batiha, "Autophagy and autophagy signaling in Epilepsy: possible role of autophagy activator," *Molecular Medicine*, vol. 29, no. 142, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1186/s10020-023-00742-2>
- [19] A. Fassio, A. Falace, A. Esposito, D. Aprile, R. Guerrini, and F. Benfenati, "Emerging Role of the Autophagy/Lysosomal Degradative Pathway in Neurodevelopmental Disorders With Epilepsy," *Frontiers in Cellular Neuroscience*, vol. 14, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.3389/fncel.2020.00039>
- [20] D. R. Hernández-Espinosa, V. Barrera-Morín, O. Briz-Tena, E. A. González-Herrera, K. D. Laguna-Maldonado, A. S. Jardínez-Díaz, M. Sánchez-Olivares, and D. Matuz-Mares, "El papel de las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno en algunas enfermedades neurodegenerativas," *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 62, no. 3, pp. 6-19, May 2019, doi: <https://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2019.62.3.03>
- [21] J. Poejo, J. Salazar, A. M. Mata, and C. Gutierrez-Merino, "The relevance of amyloid B-Calmodulin complexation in neurons and brain degeneration in Alzheimer's disease," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22, no. 9, p. 4976, May 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ijms22094976>
- [22] M. Hasegawa, "Structure of NFT: Biochemical Approach," *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 1184, pp. 23-34, Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9358-8_2
- [23] V. Cecarini *et al.*, "Neuroprotective effects of p62(SQSTM1)-engineered lactic acid bacteria in Alzheimer's disease: a pre-clinical study," *Aging*, vol. 12, no. 16, pp. 15995-16020, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.18632/aging.103900>
- [24] K. Ando *et al.*, "Picalm reduction exacerbates tau pathology in a murine tauopathy model," *Acta Neuropathologica*, vol. 139, no. 4, pp. 773-789, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00401-020-02125-x>
- [25] S. Raut, R. Patel, and A. J. Al-Ahmad, "Presence of a mutation in PSEN1 or PSEN2 gene is associated with an impaired brain endothelial cell phenotype in vitro," *Fluids and Barriers of the CNS*, vol. 18, no. 1, p. 3, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s12987-020-00235-y>
- [26] A. Álvarez-Castillo, J. M. Rodríguez-Alfaro, and A. Salas-Boza, "Influencia de la enfermedad de Alzheimer en los sistemas de neurotransmisión sináptica," *Revista Médica Sinergia*, vol. 5, no. 4, p. e442, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.31434/rms.v5i4.442>
- [27] D. Rapaka, V. R. Bitra, S. R. Challa, and P. C. Adiukwu, "mTOR signaling as a molecular target for the alleviation of Alzheimer's disease pathogenesis," *Neurochemistry International*, vol. 155, p. 105311, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2022.105311>
- [28] H. Querfurth and H. K. Lee, "Mammalian/mechanistic target of rapamycin (mTOR) complexes in neurodegeneration," *Molecular Neurodegeneration*, vol. 16, no. 1, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1186/s13024-021-00428-5>
- [29] D. Agarwal, R. Kumari, A. Ilyas, S. Tyagi, R. Kumar, and N. K. Poddar, "Crosstalk between epigenetics and mTOR as a gateway to new insights in pathophysiology and treatment of Alzheimer's disease," *International Journal Of Biological Macromolecules*, vol. 192, pp. 895-903, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbio-mac.2021.10.026>
- [30] M. Castellazzi *et al.*, "Autophagy and mitophagy biomarkers are reduced in sera of patients with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 20009, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56614-5>
- [31] Q. Cai and D. Ganesan, "Regulation of neuronal autophagy and the implications in neurodegenerative diseases," *Neurobiology Of Disease*, vol. 162, p. 105582, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2021.105582>
- [32] N. Rodríguez-Espinosa, M. G. Colaço-Harmand, and M. A. Moro-Miguel, "Uso de antipsicóticos en los pacientes con demencia en España: comparación con la prescripción de los inhibidores de la acetilcolinesterasa y de la memantina, y análisis de las asociaciones," *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, vol. 59, no. 2, p. 101446, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.regg.2023.101446>
- [33] J. Cummings, A. M. L. Osse, D. Cammann, J. Powell, and J. Chen, "Anti-Amyloid Monoclonal Antibodies for the Treatment of Alzheimer's Disease," *BioDrugs*, vol. 38, no. 1, pp. 5-22, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s40259-023-00633-2>
- [34] I. Tanida, T. Ueno, and E. Kominami, "LC3 and Autophagy," *Methods in molecular biology*, vol. 445, pp. 77-88, 2008, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-59745-157-4_4
- [35] Promega Corporation, "Autophagy Detection | LC3 Conversion assay," Worldwide Promega. Accessed: Nov. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.promega.com/es-es/products/cell-health-assays/autophagy/>

- [36] T. K. S. Ng, C. S. H. Ho, W. W. S. Tam, E. H. Kua, and R. C. Ho, "Decreased Serum Brain-Derived Neurotrophic Factor (BDNF) Levels in Patients with Alzheimer's Disease (AD): A Systematic Review and Meta-Analysis," *International Journal Of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 2, p. 257, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ijms20020257>
- [37] S. Arora, T. Kanekiyo, and J. Singh, "Functionalized nanoparticles for brain targeted BDNF gene therapy to rescue Alzheimer's disease pathology in transgenic mouse model," *International Journal Of Biological Macromolecules*, vol. 208, pp. 901-911, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.203>
- [38] M. S. Pádua, J. L. Guil-Guerrero, J. A. M. Prates, and P. A. Lopes, "Insights on the Use of Transgenic Mice Models in Alzheimer's Disease Research," *International Journal Of Molecular Sciences*, vol. 25, no. 5, p. 2805, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ijms25052805>
- [39] M. H. Kung, Y. S. Lin, and T. H. Chang, "Aichi virus 3C protease modulates LC3- and SQSTM1/p62-involved antiviral response," *Theranostics*, vol. 10, no. 20, pp. 9200-9213, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.7150/thno.47077>
- [40] P. L. Xie, M. Y. Zheng, R. Han, W. X. Chen, and J. H. Mao, "Pharmacological mTOR inhibitors in ameliorating Alzheimer's disease: current review and perspectives," *Frontiers In Pharmacology*, vol. 15, p. 1366061, May 2024, doi: <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1366061>
- [41] S. M. Fernandes, J. Mayer, P. Nilsson, and M. Shimozawa, "How close is autophagy-targeting therapy for Alzheimer's disease to clinical use? A summary of autophagy modulators in clinical studies," *Frontiers In Cell And Developmental Biology*, vol. 12, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.3389/fcell.2024.1520949>
- [42] A. Rahman *et al.*, "Aducanumab for the treatment of Alzheimer's disease: a systematic review," *Psychogeriatrics*, vol. 23, no. 3, pp. 512-522, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1111/psyg.12944>
- [43] Z. M. Hein *et al.*, "Autophagy and Alzheimer's Disease: Mechanisms and Impact Beyond the Brain," *Cells*, vol. 14, no. 12, p. 911, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/cells14120911>
- [44] Y. Hara, N. McKeehan, and H. M. Fillit, "Translating the biology of aging into novel therapeutics for Alzheimer disease," *Neurology*, vol. 92, no. 2, pp. 84-93, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000006745>

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.

Desarrollo de un Plan Director de Seguridad para infraestructuras tecnológicas virtuales en instituciones educativas públicas: aplicación de COBIT® 2019

Development of a Security Master Plan for Virtual Technological Infrastructures in Public Educational Institutions: Application of COBIT® 2019

Pablo Roberto Sandoval-Barrantes¹

Fecha de recepción: 16 de noviembre, 2024

Fecha de aprobación: 29 de marzo, 2025

Sandoval-Barrantes, P.R. Desarrollo de un Plan Director de Seguridad para infraestructuras tecnológicas virtuales en instituciones educativas públicas: aplicación de COBIT® 2019.

Tecnología en Marcha. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 66-86.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7590>

¹ Ingeniero de Infraestructura Tecnológica de la Dirección de Tecnología de Información y Comunicaciones de la Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica.
 psandoval@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5969-9480>



Palabras clave

Educación a distancia; universidad pública; plataforma digital; seguridad de los datos; centro de datos; normalización; gestión de riesgos; COBIT® 2019.

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un Plan Director de Seguridad basado en COBIT® 2019, aplicado a la infraestructura tecnológica virtual de una institución educativa pública; la Universidad Estatal a Distancia (UNED) de Costa Rica. Se indaga el contexto de la plataforma tecnológica de la institución, además mediante el uso de normas acordes al campo de la seguridad informática, se identifican las principales falencias de la infraestructura virtual con el fin de establecer un caso de estudio. A partir del caso, se proponen soluciones basadas en las buenas prácticas de gobernanza y gestión de TI a través de las iniciativas incluidas en el Plan Director de Seguridad obtenido. El enfoque metodológico para lograr la meta de la investigación incluyó el análisis situacional de la UNED y la aplicación de la guía de diseño COBIT® 2019 para personalizar controles de gobernanza y gestión. Los resultados obtenidos permitieron seleccionar procesos críticos relacionados a la necesidad de trabajar en un Sistema de Gestión de Seguridad de la Información (SGSI) como prioridad organizacional a la luz de COBIT® 2019 y otros aspectos como cumplimiento, gestión de la continuidad del negocio y gestión de incidentes, entre otros. En consecuencia, este trabajo brinda una alternativa sólida para generar planes de seguridad en instituciones con infraestructuras virtuales, aun cuando el modelo de negocio de estas sea distinto al caso de estudio en la UNED.

Keywords

Distance education; public education; digital platforms; data protection; computer security; data centers; standardization; risk management; COBIT® 2019.

Abstract

This article presents the development of a Security Master Plan based on COBIT® 2019, applied to the virtual technological infrastructure of a public educational institution, the Universidad Estatal a Distancia (UNED) in Costa Rica. The study explores the context of the institution's technological platform and using standards in accordance with the field of computer security, identifying the main weaknesses of the virtual infrastructure to establish a case study. Based on this case study, solutions are proposed following best practices in IT governance and management through the initiatives included in the resulting Security Master Plan. The methodological approach to achieve the research goal included a situational analysis of UNED and the application of the COBIT® 2019 design guide to customize governance and management controls. The results obtained allowed us to select critical processes pointing to the need to implement an Information Security Management System (ISMS) as an organizational priority in light of COBIT® 2019, along with other aspects such as compliance, business continuity management, and incident management, among others. Consequently, this work provides a solid alternative to generate security plans in institutions with virtual infrastructures, even when their business model is different from the UNED case study.

Introducción

La rápida evolución tecnológica ha transformado los modelos educativos, especialmente a los que acuden al uso de plataformas virtuales para ofrecer educación universitaria a distancia, cuyas infraestructuras tecnológicas virtuales son fundamentales para garantizar la continuidad operativa de los servicios administrativos, académicos, extensión, investigación, innovación y desarrollo, donde se requiere un acceso digital o remoto a diferentes recursos de aprendizaje, incluso a diferentes husos horarios. Sin embargo, esa fuerte dependencia de la tecnología genera desafíos para la adecuada gestión de la disponibilidad, integridad y confidencialidad de la información, lo cual se traduce en potenciales amenazas ciberneticas para los activos de información. Como objeto de estudio, se aborda el caso de la Universidad Estatal a Distancia (UNED) [1], la cual enfrenta desafíos particulares debido a su modelo operativo a distancia dependiente de su infraestructura tecnológica virtual para proporcionar servicios educativos para todo Costa Rica a través de Internet.

En este contexto, el marco COBIT® 2019 se presenta como “un marco de gobierno y gestión de información y tecnología más amplio y completo y continúa estableciéndose como un marco de referencia generalmente aceptado para el gobierno de I&T.” [2, pp. 9], proporcionando un enfoque integral para alinear la tecnología con los objetivos estratégicos de las organizaciones según ISACA [2]. Este marco también permite gestionar los riesgos asociados a las infraestructuras tecnológicas, proporcionando pautas para establecer controles específicos que permitan asegurar la protección de los activos de información de valor para cualquier institución.

Ahora bien, el objetivo de esta investigación es desarrollar un Plan Director de Seguridad para la UNED, empleando COBIT® 2019 como marco de trabajo. Según [3] un Plan Director de Seguridad “consiste en la definición y priorización de un conjunto de proyectos en materia de seguridad de la información con el objetivo de reducir los riesgos a los que está expuesta la organización hasta unos niveles aceptables, a partir de un análisis de la situación inicial”, lo cual para el caso de estudio se traduce en entregar pautas para la gestión de la seguridad informática de los equipos físicos, virtuales y servicios ofrecidos a través de la infraestructura tecnológica institucional, enfocándose en los objetivos estratégicos de la organización y priorizando asegurar la continuidad de los servicios críticos.

Además, se propone un conjunto de indicadores de mejora esperada que permitirían evaluar el impacto de la implementación del Plan Director de Seguridad en la organización.

Marco teórico

Gobernanza de TI en instituciones educativas

La gobernanza de las tecnologías de información (TI) es un componente fundamental en las instituciones educativas, principalmente por los desafíos actuales como la transformación digital, la protección de los activos digitales y el cumplimiento de los marcos regulatorios entre otros. El marco de gobierno y gestión de la información y la tecnología; denominado COBIT® 2019, desarrollado por ISACA, constituye una referencia internacional para estructurar los procesos de gobernanza TI, permitiendo alinear las capacidades tecnológicas con los objetivos estratégicos institucionales y fortalecer la seguridad de la información [4].

En concordancia con lo anterior, diversos estudios han señalado la relevancia de adoptar marcos robustos y modernos de gobernanza TI en el ámbito educativo. Moran Arellano et al. [5] demuestran que la aplicación de COBIT® 2019 en instituciones educativas contribuye a mejorar la alineación estratégica de TI y la gestión de riesgos tecnológicos, evidenciando beneficios

en la madurez organizacional. Sacón-Klinger et al. [6] documentan cómo la planificación estratégica de TI basada en COBIT® 2019, en una universidad pública ecuatoriana, permite optimizar la gobernanza institucional, fortalecer la seguridad de la información y alinear los procesos tecnológicos con los objetivos académicos.

Aportes de COBIT® 2019 a la seguridad de la información y la gestión de riesgos

Otro aspecto clave de COBIT® 2019 es su enfoque flexible para la gestión de riesgos y controles de seguridad de la información. Tiglla Tumbaico y Solís Acosta [7] evidencian que los procesos de gobierno basados en COBIT® 2019 contribuyen significativamente a la mitigación de ataques informáticos, reforzando la postura de ciberseguridad institucional. Asimismo, Orellana-Cabrera y Álvarez-Galarza [8] resaltan la aplicabilidad del marco en sectores críticos como el bancario, mostrando cómo su integración fortalece la resiliencia organizacional y el cumplimiento normativo.

De forma complementaria, Cuervo Forero [9] subraya la importancia de integrar el gobierno TI, la ciberseguridad y las comunidades digitales en la cultura organizacional como eje clave para la sostenibilidad institucional en entornos digitales. Además, remarca las diferencias y necesarias relaciones entre gobierno TI y ciberseguridad para garantizar la protección de la información.

Brecha en estudios empíricos en universidades públicas iberoamericanas

Por lo descrito, es claro que la literatura científica actual presenta una limitada cantidad de estudios empíricos que documenten la implementación de COBIT® 2019 en universidades públicas iberoamericanas, no así en otras latitudes, lo cual representa una oportunidad para ampliar el conocimiento académico y evolucionar más allá de enfoques puramente técnicos ante los desafíos de seguridad informática.

Aplicaciones internacionales de COBIT® 2019 en el sector educación

A nivel internacional, se han desarrollado estudios recientes mediante el marco COBIT® 2019, que han demostrado ser especialmente valiosos para universidades y entidades públicas con limitaciones presupuestarias o alta complejidad operativa. Por ejemplo, Fitriyani y Muhammad [10] aplicaron COBIT® 2019 para estandarizar procesos y mejorar la resiliencia de la gobernanza TI en PUSTIK STMIK Lombok, una universidad con recursos limitados de Indonesia. Wattimury y Faza [11] destacaron el uso del marco en la Fundación Educativa Bunda Hati Kudus de Indonesia para identificar el nivel de gobernanza institucional, mejorar la integración de sistemas descentralizados y alinear TI con objetivos académicos.

Mangoki et al. [12] desarrollaron un sistema de gobernanza para una universidad basado en COBIT® 2019, alineado con la planificación estratégica institucional, fundamentado en los 10 factores de diseño y 40 procesos de TI que propone el marco. Asimismo, Utomo et al. [13] resaltaron la importancia de adaptar COBIT® 2019 en instituciones de educación superior con características de PYME, evidenciando su aplicabilidad en contextos organizativos pequeños.

Aplicaciones internacionales de COBIT® 2019 en el sector público y seguridad

Por otra parte, en sectores relacionados, Hidayat et al. [14] demostraron que COBIT® 2019 contribuye a elevar la madurez de gobernanza en la industria de ciberseguridad, particularmente en dominios críticos de gestión de riesgos. Bagja et al. [15] presentaron un caso aplicado en el sector público (Unidad de Policía del Servicio Civil de Lombok Central), resaltando su efectividad en mejorar la continuidad operativa y la seguridad de los datos en organizaciones con recursos limitados.

De igual manera, Toaza et al. [16] aplicaron COBIT® 2019 en el contexto estratégico del sector público militar en un país en desarrollo (Ecuador), destacando la necesidad de personalización del marco en organizaciones grandes y centralizadas, con restricciones legales, operativas y presupuestarias, características típicas de los entornos públicos en América Latina.

Justificación metodológica del presente estudio

El presente estudio se apoya en estos aportes que consideraron variables clave como recursos, tamaño organizativo, sector y complejidad operativa. Además, consolida como un acierto el empleo del *COBIT® 2019 Design Toolkit* como herramienta metodológica base para el diseño del Plan Director de Seguridad, en línea con las recomendaciones presentadas en [17].

La integración de estas experiencias fortalece la base teórica del trabajo y refuerza la pertinencia de los resultados obtenidos para el contexto de la UNED, ofreciendo un enfoque integral que contribuya al fortalecimiento de la seguridad de la información y de la gobernanza TI en el ámbito educativo.

Materiales y métodos

El enfoque metodológico adoptado para desarrollar el Plan Director de Seguridad de la UNED, se sustentó en los lineamientos para elaborar informe modalidad proyecto y la estructura de la tesis de maestría elaborada por el autor de este artículo [1], como se detalla a continuación:

Tipo de Investigación

La investigación adopta un enfoque cuantitativo [18] debido a la necesidad de medir el impacto de las políticas y controles de seguridad con el marco de trabajo COBIT® 2019. La cuantificación se centra mayormente en el análisis de eficiencia operativa, cumplimiento, gestión de incidentes, reducción de riesgos y disponibilidad de sistemas. Además, tiene un alcance exploratorio [18], ya que busca examinar un campo relativamente novedoso: la aplicación de COBIT® 2019 para la gestión de la seguridad de infraestructuras virtuales.

Lugar y Contexto de la Investigación

La investigación se llevó a cabo como tesis de Magíster en Seguridad Informática de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, elaborada por el autor de este artículo [1] y fue aplicada en la Universidad Estatal a Distancia (UNED), una institución pública de educación superior que depende de plataformas tecnológicas virtuales para su funcionamiento. El contexto educativo y la infraestructura tecnológica de la UNED constituyen el entorno donde se realiza y evalúa el Plan Director de Seguridad resultante.

Métodos y Herramientas Utilizadas

Se aplicó la guía de diseño “*COBIT® 2019 Design Toolkit*” [19] como herramienta principal para personalizar los controles de seguridad, adaptando el marco COBIT® 2019 [2],[20] a las necesidades específicas de la institución. Se recurrió a las normas ISO/IEC27001, ISO/IEC27002 e ISO/IEC27014 [21],[22],[23], así como a la guía de Introducción y Metodología de COBIT® 2019 [4] para brindar sustento a los insumos que fueron ingresados en la herramienta de diseño.



Figura 1. Vista general de la herramienta guía de diseño (COBIT® 2019 Design Toolkit) utilizada para cuantificar la situación de la seguridad de la información al caso de la UNED y posterior análisis de resultados. Fuente: [19].

“En la imagen anterior se muestra una vista de la herramienta de diseño COBIT® 2019 con valores detallados. Además, se indican las 4 principales interfaces que permiten elaborar el flujo de trabajo para obtener un diseño de sistema de gobierno personalizado. La primera pestaña corresponde a instrucciones generales de llenado de información y uso de la herramienta, la segunda pestaña es el cuadro consolidado a interpretar. Las pestañas DF1-10 corresponden a los 10 factores de diseño específicos que se trabajan a partir del contexto previamente analizado, y las pestañas de resumen corresponden al Paso 2 de valores obtenidos y el Paso 3 para refinamiento de todos los valores.”[1, pp. 56]

Actividades realizadas

Se realizó un diagnóstico del estado actual mediante recopilación de información de activos de información y entrevistas a personal clave con el fin de crear la documentación relacionada al modelo de plataforma tecnológica existente en la UNED y alineada a normas competentes en seguridad de la información como ISO/IEC27001, ISO/IEC27002 e ISO/IEC27014 [21],[22],[23].

Se continuó con un análisis de las necesidades relacionadas a los procesos y servicios críticos para la UNED que requieren controles adicionales. Además, se construyó el caso a partir de la guía de Introducción y Metodología de COBIT® 2019 [4, pp. 53] y se evaluaron las políticas de seguridad existentes y posibles brechas en la gestión de seguridad de la infraestructura virtual.

Finalmente se aplicó la guía de diseño “COBIT® 2019 Design Toolkit” [19, pp. 31-66] al caso de estudio y se obtuvo el diseño del Plan Director de Seguridad para los equipos físicos y virtuales, así como para los servicios ofrecidos a través de la infraestructura tecnológica de virtualización en la UNED, considerando incluso la definición de métricas específicas para cada control propuesto, alineando las acciones con los objetivos estratégicos de la organización. Las principales fases del plan director obtenido a saber:

- Análisis de la situación actual (a partir de los resultados al aplicar COBIT® 2019).
- Identificación de riesgos y vulnerabilidades.
- Propuesta de **iniciativas de seguridad** claves para el caso particular de la UNED.

Resultados y discusión

Para el diagnóstico de la situación de la UNED se recurrió al personal de la Dirección de Tecnología de Información y Comunicaciones (DTIC) de la institución para comprobar el modelo de Plataforma Tecnológica de la UNED, así como los equipos físicos y virtuales de la infraestructura tecnológica que soportan la operación de la Institución. Lo anterior evidenció que “la UNED tiene un modelo de plataforma tecnológica orientado a la virtualización de equipos y uso de redes de datos, brindando sus servicios a través de Internet”[1, pp. 45] y además “se comprobó que la UNED maneja un inventario de activos de información (reflejado en varios documentos) que contempla los equipos físicos y virtuales de la infraestructura.” [1, pp. 46]

Con el apoyo de las normas ISO/IEC 27001/27002 [21],[22] se realizó un análisis de la situación descubierta en el diagnóstico anterior, se logró hacer una valoración de la gestión de activos y responsabilidades de la infraestructura tecnológica virtual así como una clasificación de los mismos, encontrando una “necesidad de mejora en cuanto a buenas prácticas e incluso controles específicos en materia de seguridad de la información, principalmente en los procedimientos del manejo de equipos virtuales” [1, pp. 51]

Debido a la situación anteriormente expuesta para el caso de estudio en la UNED, es que se plantea la oportunidad de utilizar la “herramienta de diseño COBIT® 2019 que provee ISACA para comprender el alcance inicial a partir de la influencia de factores de diseño sobre los objetivos de gobierno o gestión de COBIT® 2019” [1, pp. 53] y así poder hacer “ un mapeo inicial de los objetivos de gobierno y gestión a priorizar en relación con la seguridad de la información de la infraestructura tecnológica virtual y servicios ofrecidos” [1, pp. 53]. A partir de los datos del caso de estudio ingresados en la herramienta de diseño COBIT® 2019 se obtienen los siguientes resultados cuantificados:

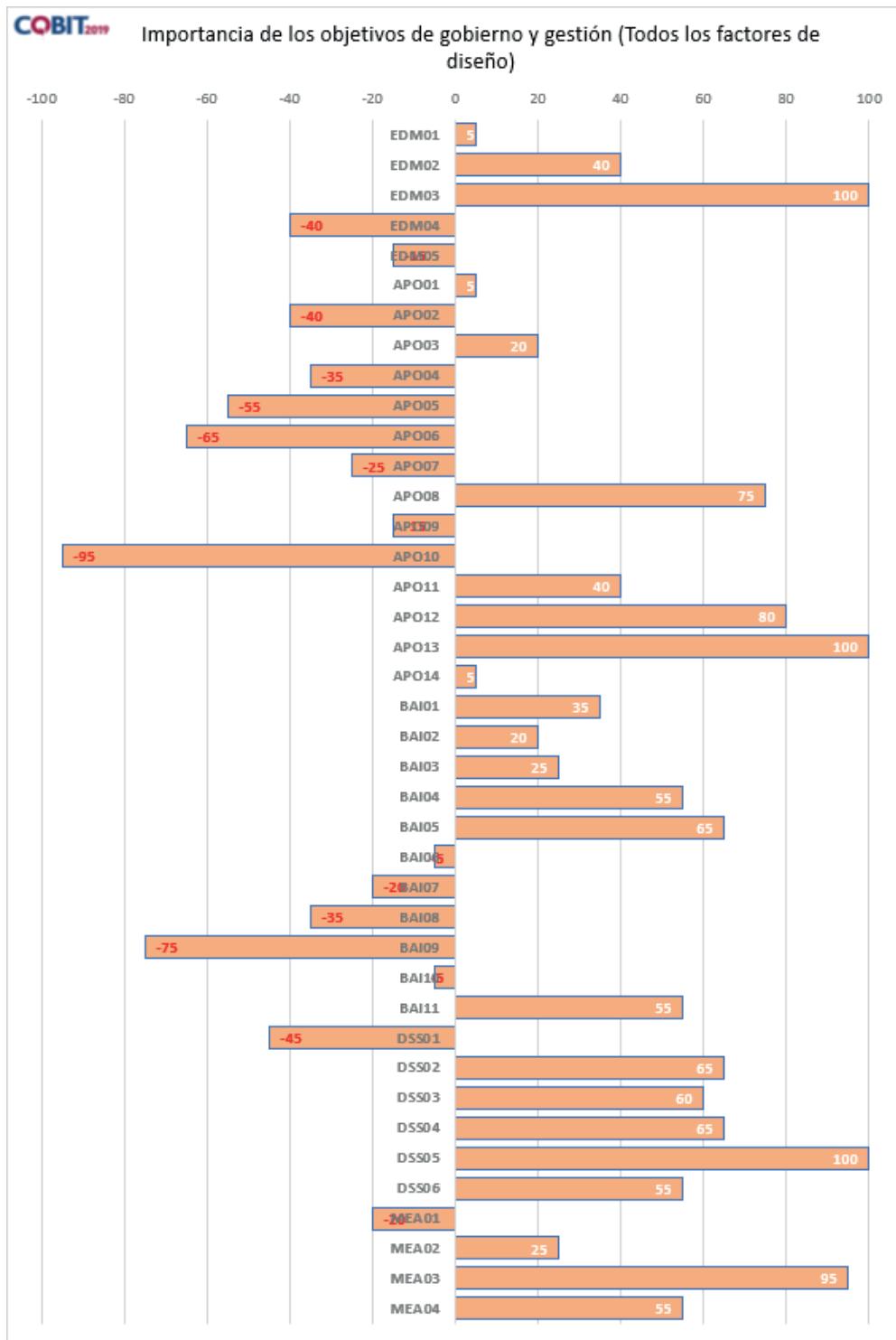


Figura 2. Resumen de objetivos de gobierno y gestión COBIT® 2019 obtenidos al aplicar la guía de diseño al caso de estudio de la UNED. Fuente: [1].

La Figura 2 anterior muestra los resultados que detallan los rasgos propios de la situación en seguridad de información para la UNED, destacando los valores del objetivo “de gobierno EDM03-Asegurar la optimización del riesgo, así como para los objetivos de gestión APO12-

Gestionar el riesgo, APO13-Gestionar la seguridad, DSS05-Gestionar los servicios de seguridad y MEA03-Gestionar el cumplimiento de los requisitos externos" [1, pp. 68], como los de mayor ajuste (+80 o +100) en importancia para realizar conclusiones sobre seguridad.

Consecuente con los resultados anteriores obtenidos de la herramienta de diseño COBIT® 2019, fue posible cuantificar la situación y establecer prioridades para las áreas claves relacionadas a la infraestructura tecnológica virtual de la institución y la seguridad de la información de estas, dando como resultado la propuesta del Plan Director de Seguridad.

Plan Director de Seguridad desarrollado

A continuación, se presentan las siguientes siete (7) iniciativas que conforman el "Plan director para la gestión de la seguridad informática de los equipos físicos, virtuales, y para los servicios ofrecidos a través de la infraestructura tecnológica de virtualización en la UNED [1, pp. 76]":

Cuadro 1. Extracto de las iniciativas incluidas en el Plan Director de Seguridad obtenido para el caso de la UNED Modificado de: [1, pp. 76-80].

INICIATIVA 1: Desarrollar políticas y/o normativa de seguridad para los diferentes componentes físicos y virtuales de la infraestructura tecnológica y servicios contenidos en esta.

DESCRIPCIÓN:

Generar normativa interna que responda a los requerimientos mínimos de seguridad de la información para proteger la infraestructura tecnológica actual, en concordancia con las políticas institucionales existentes, sustentada en la valoración existente de riesgos en I&T y en normas propias de la seguridad de la información, compatibles con la UNED.

- Obtener el compromiso de las unidades estratégicas de la DTIC.
- Elaborar controles mínimos de seguridad informática acorde a los riesgos identificados.
- Mejorar la gestión del inventario de activos de información, incluyendo su actualización periódica y gestión de responsables.

APOYO DOCUMENTAL:

- Sistema Específico de Valoración de Riesgo Institucional (SEVRI) de la UNED.
- Ley General de Control Interno N°8292.
- ISO/IEC 27005.
- CMMI Data Management Maturity Model.
- ISF, The Standard of Good Practice for Information Security.
- ISO/IEC 27001.
- CMMI Cybermaturity Platform.
- PMBOK Guide, 6.^a edición.

INICIATIVA 2: Diseño inicial de un SGSI.

DESCRIPCIÓN:

Diseñar un Sistema de Gestión de la Seguridad de la Información (SGSI), con alcance integral, a fin de proteger la infraestructura tecnológica virtual y los servicios.

- Contemplar las actividades actuales de atención de eventos y amenazas de seguridad informática, continuidad y disponibilidad de los servicios.
- Definir el alcance del SGSI, los activos de información que son abarcados y los procesos involucrados, incluyendo sus controles, responsabilidades.
- Definir la ruta o pasos a seguir para la implementación y mantenimiento del SGSI.

APOYO DOCUMENTAL:

- ISO/IEC 20000-1
- ISO/IEC 27001, ISO/IEC 27002.
- ITIL V3.
- COBIT® 2019: APO13-Gestionar la seguridad
- Estrategia Nacional de Ciberseguridad Costa Rica 2017. San José, CR, MICITT, 2017.
- ISF, The Standard of Good Practice for Information Security.
- CMMI Data Management Maturity Model.
- The CIS Critical Security Controls for Effective Cyber Defense Versión 6.1.
- CMMI Cybermaturity Platform.
- Skills Framework for the Information Age V6.
- Institute of Standards and Technology Special Publication 800-53.
- HITRUST CSF versión 9

INICIATIVA 3: Plan de continuidad del negocio

DESCRIPCIÓN:

Incluir los equipos y servicios de la infraestructura tecnológica virtual de la UNED, dentro del alcance del plan de continuidad del negocio.

- Atender las interrupciones ocasionadas por eventos no planificados que puedan afectar la infraestructura tecnológica virtual.
- Establecer para la UNED los valores aceptables de recuperación de las operaciones, y de disponibilidad de la infraestructura y sus servicios críticos.

APOYO DOCUMENTAL:

- Política de gestión del riesgo y continuidad de los servicios en la UNED.

INICIATIVA 4: Optimizar la atención de incidentes recurrentes relacionados a la operación de la infraestructura tecnológica virtual.

DESCRIPCIÓN:

Documentar los incidentes operativos recurrentes que afecten o puedan afectar la infraestructura tecnológica virtual y los servicios críticos, para realizar un análisis que permita optimizar su resolución y crear oportunidades de prevención y mejora.

-Documentar incidentes de manera exhaustiva.

-Identificar causas de incidentes relacionadas a la infraestructura tecnológica virtual, y establecer pasos a seguir para corregir o modificar los aspectos disfuncionales, a fin de corregir problemas de disponibilidad del servicio, adquirir equipos más adecuados o utilizar los recursos existentes de manera más efectiva.

APOYO DOCUMENTAL:

- ISO/IEC 20000-1 sección 8.2 Administración de problemas.
- CMMI Cybermaturity Platform.
- ITIL V3.

INICIATIVA 5: Gestionar la capacidad de la infraestructura tecnológica virtual

DESCRIPCIÓN:

Gestionar la capacidad de la infraestructura tecnológica virtual en función de los requisitos de los servicios soportados en la DTIC y para la UNED, considerando el rendimiento y los valores óptimos de disponibilidad esperada para estos servicios.

-Documentar los requerimientos de recursos actuales y a futuro que resulten adecuados para la UNED.

-Establecer valores óptimos de nivel de recursos para los requerimientos y brindar seguimiento continuo.

- Propuesta de Marco de Gobierno y Gestión TI de la UNED (En desarrollo con CONARE).
- Documentación interna de la UNED, plan de capacidad, suministro y nivel de servicio.

-CMMI Cybermaturity Platform.

APOYO DOCUMENTAL:

- ISF, The Standard of Good Practice for Information Security.
- ISO/IEC 20000-1.
- ITIL V3.

INICIATIVA 6: Establecer y documentar controles de integridad de la información para la infraestructura tecnológica virtual.

DESCRIPCIÓN:

Proponer uso de normativas para la seguridad de la información, específicamente con el fin de atender la integridad de los activos de información de la infraestructura tecnológica virtual.

-Extender el uso de estas normativas o buenas prácticas de seguridad a los proveedores que brinden servicios a la infraestructura tecnológica virtual.

APOYO DOCUMENTAL:

- ISO/IEC 27002 sección 7.
- National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-37.
- The CIS Critical Security Controls for Effective Cyber Defense Versión 6.1.
- ISF, The Standard of Good Practice for Information Security 2016: BA1.4 Information Validation.
- CMMI Cybermaturity Platform: gestión de acceso.
- Skills Framework for the Information Age V6, 2015, seguridad y gestión secciones SCTY y SCAD.

INICIATIVA 7: Otras consideraciones en seguridad de la información.

DESCRIPCIÓN:

Complementar la seguridad de la información de la infraestructura tecnológica virtual mediante actividades de concientización, ampliando las existentes o generando nuevas y mejorar la comunicación entre las diferentes áreas involucradas, a fin de trabajar la seguridad de la información de la infraestructura tecnológica virtual de una manera integral y transversal a las áreas de la UNED.

APOYO DOCUMENTAL:

- ISO/IEC 27001
- Creating a Culture of Security, ISACA, 2011

Fuente: [1]

El Cuadro 1 anterior es el producto de la construcción del caso de estudio con el marco de trabajo COBIT® 2019, que permitió identificar los objetivos de gobierno y gestión que tienen mayor relevancia para la seguridad de la información de la UNED, permitiéndole enfocar sus esfuerzos en áreas de alto impacto, tales como la gestión de riesgos, servicios de seguridad, cumplimiento normativo, incluso preparar a la organización para enfrentar futuros desafíos tecnológicos, optimizando recursos y creando resiliencia para su infraestructura crítica.

Finalmente, a partir de los resultados, es necesario destacar las siguientes iniciativas que resultaron relevantes para la UNED:

- El Sistema de Gestión de Seguridad de la Información (SGSI) está en línea con los objetivos COBIT® 2019 de mayor ajuste positivo (+100), como la optimización del riesgo y gestión de servicios de seguridad (Figura 2). Esto indica que implementar el SGSI es una prioridad institucional según el marco de referencia COBIT® 2019.
- La importancia asignada al cumplimiento de requisitos externos (ajuste +95) justifica las iniciativas sobre políticas y normativas de seguridad, la UNED se debe mantener en conformidad con los estándares y regulaciones para brindar estabilidad de la infraestructura tecnológica y dar transparencia como universidad pública.
- No menos importante se tiene el objetivo DSS04-la gestión de la continuidad del negocio y objetivo DSS02- la gestión de peticiones e incidentes (ambos con ajustes de +65) alertan a la UNED sobre la importancia en la atención de incidentes y asegurar la continuidad operativa mediante respuestas eficaces a eventos inesperados, siendo un aspecto crítico para una institución de educación a distancia y en línea.

Indicadores de mejora esperada

El desarrollo del Plan Director de Seguridad basado en COBIT® 2019 es una propuesta metodológica, para la cual se identifican una serie de indicadores clave de desempeño (KPI) de referencia que permitirían evaluar el impacto esperado en su implementación dentro de la UNED, incluso se pueden utilizar como base para un sistema de monitoreo continuo de la seguridad de la información y medición de resultados a futuro en cualquier otra organización. A continuación, la lista de los indicadores:

Cuadro 2. Indicadores clave de desempeño KPI 01 como referencia para evaluar impacto del Plan Director de Seguridad.

KPI 01:		
Cumplimiento de controles de seguridad para la mitigación de ataques informáticos.		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 1 (políticas y controles).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	-Sistema Específico de Valoración de Riesgo Institucional (SEVRI) de la UNED [24].	
Fórmula	1: Valoración de riesgo (SEVRI) completada. Y: Años desde que se realizó la última valoración.	
Valor actual estimado	50% (1 valoración de riesgos (SEVRI) cada 2 años)	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	100% (1 valoración de riesgos (SEVRI) anual)	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	1 año.	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
X = 100% (1 valoración de riesgos (SEVRI) anual)	50% ≤ X ≤ 90% (1 valoración de riesgos (SEVRI) cada 1,5 años)	X < 50% (1 valoración de riesgos (SEVRI) cada 2 años o más)
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 6 (integridad).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	-ISO/IEC 27002 [22].	
Fórmula	Y: Controles de seguridad identificados como críticos o aplicables a la institución. Seleccionados a partir de los 93 controles relacionados a seguridad establecidos en la norma ISO/IEC 27002. Z: Controles de seguridad efectivos o debidamente aplicados en la institución.	
Valor actual estimado	32.05% (Porcentaje (%) de controles de seguridad efectivos: 25 controles críticos actualmente aplicados en la UNED de un máximo de 78 aplicables a la misma institución)	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	70.51% (Porcentaje (%) de controles de seguridad efectivos: 55 controles críticos y de mejora en el caso de la UNED de un máximo de 78 aplicables a la misma institución)	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	18-36 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
X > 90%	70% ≤ X ≤ 90%	X < 70%

Cuadro 3. Indicadores clave de desempeño KPI 02 como referencia para evaluar impacto del Plan Director de Seguridad.

KPI 02:		
Nivel de madurez en seguridad de la información (basado en COBIT® 2019).		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 2 (SGSI).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	<p>-COBIT® 2019 [4].</p> <p>-CMMI V3.0. CMMI Model Quick Reference Guide [25] apartado ESEC (Enabling Security)</p>	
Fórmula	<p>Asignar 1 de 3 niveles según guía CMMI V3.0:</p> <p>Nivel 1: Identificar, abordar y priorizar las necesidades y los problemas de seguridad.</p> <p>Nivel 2: Identificar, abordar y priorizar las necesidades y los problemas de seguridad para desarrollar un enfoque y objetivos de seguridad que aborden las necesidades físicas, de misión, de personal, de procesos y de ciberseguridad.</p> <p>Nivel 3: Requiere una capacidad de operaciones de seguridad organizacional para implementar una estrategia, un enfoque y una arquitectura de seguridad organizacional. Realizar revisiones y evaluaciones de seguridad y actúa en función de sus resultados. [25]</p>	
Valor actual estimado	Nivel 2	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	Nivel 3	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	18-24 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
Nivel 3	Nivel 2	Nivel 1
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 2 (SGSI).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	<p>-COBIT® 2019 [4].</p> <p>-CMMI V3.0. CMMI Model Quick Reference Guide [25] apartado MST (Managing Security Threats & Vulnerabilities)</p>	

KPI 02:		
Nivel de madurez en seguridad de la información (basado en COBIT® 2019).		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 2 (SGSI).	
Fórmula	<p>Asignar 1 de 4 niveles según guía CMMI V3.0:</p> <p>Nivel 1: Identificar y registrar las amenazas y vulnerabilidades de seguridad, y tomar las medidas adecuadas para abordarlas.</p> <p>Nivel 2: Crear y mantener un método para gestionar las amenazas y vulnerabilidades de seguridad, incluyendo criterios de evaluación actualizados. Utilizar estos criterios para priorizar, supervisar y abordar las amenazas y vulnerabilidades críticas.</p> <p>Evaluar e informar sobre la eficacia del enfoque y las medidas adoptadas para gestionar estos problemas.</p> <p>Nivel 3: Crear, actualizar y aplicar una estrategia, un enfoque y una arquitectura de seguridad organizacional para evaluar, gestionar y verificar las amenazas y vulnerabilidades. Analizar los resultados de la verificación y validación de seguridad para garantizar la precisión y la coherencia en toda la organización. Evaluar la eficacia de la estrategia, el enfoque y la arquitectura de seguridad para abordar estas amenazas y vulnerabilidades.</p> <p>Nivel 4: Utilizar el análisis de inteligencia de amenazas, junto con técnicas estadísticas y cuantitativas, para mejorar el enfoque y la arquitectura de seguridad. Seleccionar soluciones de seguridad para abordar las amenazas y vulnerabilidades con base en este análisis. [25]</p>	
Valor actual estimado	Nivel 2	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	Nivel 3	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	18-24 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
Nivel 4	Nivel 2 - Nivel 3	Nivel 1

Cuadro 4. Indicadores clave de desempeño KPI 03 como referencia para evaluar impacto del Plan Director de Seguridad.

KPI 03:		
Disponibilidad de servicios críticos (plataforma virtual, sistemas de gestión académica, correo institucional, otros).		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 3 (continuidad del negocio).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	<p>-Política de gestión del riesgo y continuidad de los servicios en la UNED [26].</p> <p>-ISO/IEC 27001 [21]. (Anexo A.17).</p> <p>-ISO22301 [27].</p>	
Fórmula	<p>Y: Equipos y servicios de la infraestructura tecnológica virtual incluidos en el alcance del plan de continuidad del negocio.</p> <p>Z: Equipos y servicios de la infraestructura tecnológica virtual comprobados en el plan de continuidad del negocio.</p>	
Valor actual estimado	Dato no confirmado.	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	<p>50% o más.</p> <p>(Este valor lo debe definir cada organización según sus prioridades institucionales)</p>	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	12-24 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
X > 80%	50% ≤ X ≤ 80%	X < 50%

Cuadro 5. Indicadores clave de desempeño KPI 04 como referencia para evaluar impacto del Plan Director de Seguridad.

KPI 04:		
Número de incidentes/problemas operativos registrados por año.		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 4 (gestión de incidentes operativos que afectan la disponibilidad).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	-ISO/IEC 20000-1 [28]	
Fórmula	<p>Y: Total de incidentes registrados en el periodo anterior.</p> <p>Z: Total de incidentes reportados en el periodo actual.</p>	
Valor actual estimado	Línea base, se deben empezar a registrar los incidentes.	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	<p>-Tomar datos primer periodo.</p> <p>-Reducir incidentes en 25% o más a partir del registro del segundo periodo, respecto al registro inicial del primer periodo.</p> <p>(Este valor lo debe definir cada organización según sus prioridades institucionales)</p>	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	12-24 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
X > 50%	0% ≤ X ≤ 50%	X < 0%

Cuadro 6. Indicadores clave de desempeño KPI 05 como referencia para evaluar impacto del Plan Director de Seguridad.

KPI 05:		
Capacidad de infraestructura tecnológica virtual.		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 5 (capacidad de infraestructura virtual).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	-COBIT® 2019 [4]. -DTIC UIT F01 Plan para la gestión de la capacidad de la Infraestructura TI [29].	
Fórmula	Y: Porcentaje (%) de consumo de equipos servidores. Z: Porcentaje (%) de consumo de equipos de red. W: Porcentaje (%) de consumo de equipos de respaldos.	
Valor actual estimado	Servidores: 80% Red: 20% Respaldos: 80%	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	Servidores: 80% Red: 50% Respaldos: 80%	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	12-24 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
Servidores: $85\% > X \geq 70\%$ Red: $85\% > X \geq 55\%$ Respaldos: $90\% > X \geq 70\%$	Servidores: $70\% > X > 50\%$ Red: $55\% > X > 20\%$ Respaldos: $70\% > X > 50\%$	Servidores: $X \geq 85\% \text{ o } X \leq 50\%$ Red: $X \geq 85\% \text{ o } X \leq 20\%$ Respaldos: $X \geq 90\% \text{ o } X \leq 50\%$

Cuadro 7. Indicadores clave de desempeño KPI 06 como referencia para evaluar impacto del Plan Director de Seguridad.

KPI 06:		
Personal y contratistas capacitados en ciberseguridad.		
Iniciativa del Plan Director referenciada o relacionada	Iniciativa 7 (cultura y concientización).	
Marco de referencia sugerido o utilizado en métrica.	-ISO/IEC 27001 [21]. (Anexo A.7.2)	
Fórmula	Y: Total de personas funcionarias y contratistas activas en la organización. Z: Total de personas funcionarias y contratistas capacitados en ciberseguridad.	
Valor actual estimado	$\leq 10\%$	
Meta esperada después de aplicar iniciativa del Plan Director propuesto.	Al menos 35% a partir del tercer año. (Este valor depende de la capacidad de cada institución para capacitar el volumen de empleados necesario en el año).	
Frecuencia/Tiempo ejecución sugerido	12-36 meses	
Nivel de tolerancia sugerido		
Óptimo	Bueno	Deficiente
$X \geq 95\%$	$95\% > X > 60\%$	$X \leq 60\%$

En los cuadros 2, 3, 4, 5, 6 y 7 anteriores se aprecian los indicadores recomendados para evaluar el impacto de llevar a cabo la implementación del Plan Director de Seguridad descrito en este artículo. Estos KPI representan importantes valores de referencia y metas esperadas orientativas que pueden requerir ajustes en función del contexto operativo y los recursos disponibles durante la fase de implementación efectiva del Plan Director de Seguridad en la organización, por lo que algunos valores se alinearon al caso de estudio en la UNED, pero las normas referenciadas permiten modificaciones si así lo requiere cualquier organización.

Además de alinearse con el marco COBIT® 2019 y diversas normas ISO/IEC [21][22][27][28], los KPI propuestos enfatizan las prácticas recomendadas en las áreas de Enabling Security (ESEC) y Managing Security Threats & Vulnerabilities (MST) del modelo CMMI® v3.0 [25] con el fin de avanzar hacia la madurez en seguridad operativa y gestión de amenazas en cualquier organización.

Limitaciones y consideraciones de la implementación

Si bien el Plan Director de Seguridad propuesto proporciona un marco estructurado y alineado con las mejores prácticas internacionales para fortalecer la seguridad de la información en la Universidad Estatal a Distancia (UNED), su implementación efectiva podría enfrentar diversos desafíos y limitaciones que es importante considerar:

- En primer lugar, la resistencia al cambio organizacional puede ser un obstáculo importante, especialmente en entornos académicos donde la autonomía de las diferentes unidades y departamentos podría dificultar la adopción uniforme de los controles y políticas de seguridad propuestos, incluso con limitaciones relacionadas con conflictos de espacios de poder entre las áreas de la institución [6].
- Por otra parte, la asignación de recursos humanos y financieros son un desafío para el despliegue de nuevas medidas de seguridad de la información, lo cual depende en gran medida del compromiso institucional de ir más allá de la implementación de controles a establecer medidas integrales que evolucionen con las amenazas y los requisitos normativos.
- Asimismo, la existencia de infraestructuras tecnológicas heterogéneas y sistemas heredados puede representar una lucha técnica abrumadora, ya que es posible que algunos sistemas no soporten fácilmente los niveles de control y monitoreo que el plan sugiere o no se cuente con el conocimiento por parte del personal a cargo. Esto requerirá esfuerzos adicionales de integración, capacitación y modernización.
- Adicionalmente, se identificaron algunas limitaciones durante el uso de la herramienta COBIT® 2019 Design Toolkit. Tal como advierte [17], la herramienta presenta un nivel limitado con vocabulario y lenguaje técnico que pueden dificultar la comprensión a usuarios con menos experiencia, incluso a aquellos del área de TI [17]. Estos aspectos se subsanaron durante el estudio mediante esfuerzos adicionales de interpretación y validación de resultados, lo cual constituye un factor a considerar en futuras aplicaciones.
- Finalmente, el éxito del Plan Director de Seguridad dependerá en gran medida del desarrollo de una cultura institucional de seguridad de la información que empieza por las autoridades. Sin un compromiso activo por parte de la alta dirección y una adecuada capacitación y concientización de todas las personas funcionarias, incluso el mejor diseño de controles podría resultar insuficiente para mitigar los riesgos en seguridad de manera efectiva.

Estas consideraciones resaltan la necesidad de abordar la implementación del plan como un proceso progresivo y adaptable mediante estrategias específicas para superar las limitaciones mencionadas y maximizar su efectividad en el tiempo.

Conclusiones

- El diseño del Plan Director de Seguridad es eficaz y personalizado debido a que se obtiene a partir del enfoque integral para abordar las debilidades en seguridad de la información de la infraestructura tecnológica de UNED. Los controles y políticas propuestos se alinean con las mejores prácticas internacionales respaldadas por un marco de trabajo reconocido y probado como lo es COBIT® 2019.
- La herramienta de diseño COBIT® 2019 permitió obtener un Plan Director de Seguridad que alinea las políticas de seguridad con los objetivos institucionales.
- El Plan Director de Seguridad se debe actualizar y ajustar a medida que evoluciona la tecnología y las amenazas cibernéticas, con el fin de mejorar la gestión de seguridad en la UNED u otras entidades que repliquen el caso.
- La aplicación de COBIT® 2019 a la seguridad de la información de la UNED es una valiosa referencia para otras universidades y organismos académicos análogos, facilitando replicar la metodología utilizada para crear y ajustar un Plan Director de Seguridad a sus necesidades específicas, contribuyendo a la protección de la infraestructura tecnológica virtual y mitigar posibles riesgos en entornos académicos inclusive más complejos.

Recomendaciones

- Se pueden realizar estudios adicionales en un entorno operativo o técnico con los controles propuestos y evaluar la posibilidad de extender el Plan Director de Seguridad a otras áreas de la institución con el fin de adaptarlo a nuevos desarrollos tecnológicos y brindar una mejor protección.
- Es recomendable la adopción de marcos de gobernanza como COBIT® 2019 en otras instituciones públicas o privadas que dependan de infraestructuras virtuales para asegurar una gestión de riesgos eficiente.
- Los indicadores clave de desempeño (KPI) propuestos son una valiosa guía para facilitar la visión de los resultados esperados en un Plan Director de Seguridad en cualquier organización.

Agradecimientos

A la Universidad Estatal a Distancia en Costa Rica y su Consejo de Becas Institucional, por su colaboración y patrocinio de la tesis de maestría que brindó los insumos para este artículo científico, así como a la Mag. Patricia Prandini por su orientación en la dirección de tesis.

Referencias

- [1] P. R. Sandoval Barrantes, "Desarrollo de un plan para la gestión de la seguridad de la información de la infraestructura tecnológica virtual y sistemas convergentes en la universidad estatal a distancia de la República de Costa Rica", Trabajo Final de Posgrado, Univ. de Buenos Aires, CABA, Argentina, 2021. [En línea]. Disponible en: http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/tpos/1502-2127_SandovalBarrantesPR.pdf
- [2] ISACA, *COBIT® 2019 Framework: Governance and Management Objectives*, Illinois, EE.UU.: ISACA, 2019.

- [3] Incibe. "Plan director de seguridad". https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/dosieres/metad_plan-director-seguridad.pdf. Accedido el 4 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/dosieres/metad_plan-director-seguridad.pdf.
- [4] ISACA, *COBIT® 2019 Marco de Referencia: Introducción y metodología*, Illinois, EE.UU.: ISACA, 2019.
- [5] A. S. M. Arellano, P. R. J. Santana, M. de J. J. Santana, y J. C. F. Valverde, «Aplicación de COBIT® 2019 al gobierno y gestión de las tecnologías de información en instituciones educativas sin fines de lucro», *South Florida Journal of Development*, vol. 4, n.º 3, pp. 1388–1410, jun. 2023. [En línea]. DOI: <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n3-027>
- [6] H. A. Sacón-Klinger, S. Patiño, J. D. Rodríguez Vizuete, A. P. Mora-Olivero, N. Quiñonez Godoy, y R. A. Macías-Lara, "Planificación estratégica de tecnología de la información para la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, basado en COBIT® 2019," *Sapienza International Journal of Interdisciplinary Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 1168–1186, 2022. [En línea]. DOI: <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i1.297>
- [7] B. D. Tiglla Tumbaico y E. F. Solís Acosta, «Procesos de gobierno basado en COBIT® 2019 para mitigar ataques informáticos», *RECIMUNDO*, vol. 6, n.º 4, pp. 671–680, nov. 2022. [En línea]. DOI: [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(4\).octubre.2022.671-680](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(4).octubre.2022.671-680)
- [8] X. E. Orellana-Cabrera y M. D. Álvarez-Galarza, "Marco de trabajo de gobierno de TI orientado a la ciberseguridad para el sector bancario bajo COBIT® 2019," *Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 3, pp. 706–723, marzo 2022. [En línea]. DOI: <https://doi.org/10.23857/pc.v7i3.3758>
- [9] A. R. Cuervo Forero, Importancia del Gobierno TI, Ciberseguridad y Comunidades Digitales, Universidad Piloto de Colombia, ensayo, jul. 24, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/13076>
- [10] B. Y. Fitriyani and A. H. Muhammad, "COBIT® 2019 for Enhanced ICT Governance: A Case Study at a Higher Education Institution," *Journal of Information Systems and Informatics*, vol. 7, no. 1, pp. 45–48, Mar. 2025. [En línea]. DOI: 10.51519/journalisi.v7i1.972
- [11] G. Wattimury and A. Faza, "COBIT® 2019 Implementation for Enhancing IT Governance in Educational Institutions," *JISKA (Jurnal Informatika Sunan Kalijaga)*, vol. 8, no. 3, pp. 210–221, Sep. 2023. [En línea]. DOI: 10.14421/jiska.2023.8.3.210-221
- [12] W. Mangoki, D. Manongga, and A. Iriani, "IT Governance Design in XY University using COBIT® 2019 Framework," *Jurnal Sistem Informasi Bisnis*, vol. 2, pp. 111–122, 2024. [En línea]. DOI: 10.21456/vol14iss2pp111-122
- [13] D. Utomo, M. Wijaya, Suzanna, Efendi, and N. T. M. Sagala, "Leveraging COBIT® 2019 to Implement IT Governance in SME Context: A Case Study of Higher Education in Campus A," *CommIT Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 129–141, 2022. [En línea]. DOI: 10.21512/commit.v16i2.8172
- [14] R. S. Hidayat, R. E. Indrajit, and E. Dazki, "Evaluation of Information Technology Governance Maturity Using COBIT® 2019: A Case Study on the IT Security Industry," *Journal La Multiapp*, vol. 5, issue 4, pp. 478–487, 2024. [En línea]. DOI: 10.37899/journallamultiapp.v5i4.1514
- [15] A. Bagja, Z. Amri, K. Imtihan, M. Rodi, and S. Y. Rusniatun, "Enhancing Public Sector IT Governance through COBIT® 2019: A Case Study on Service Continuity and Data Management in the Central Lombok," *Journal of Information Systems and Informatics*, vol. 6, no. 4, pp. 2761–2764, Dec. 2024. [En línea]. DOI: 10.51519/journalisi.v6i4.924
- [16] G. Toaza, C. Montenegro, and C. Salazar, "Designing an I&T Governance System in the Context of Strategic Public Sector Based on COBIT 2019 Framework. Case Study in a Developing Country," *Proc. 5th Int. Conf. on Information Management and Management Science (IMMS 2022)*, Chengdu, China, pp. 401-406, Ago. 2022. [En línea]. DOI: 10.1145/3564858.3564920
- [17] E. Amore, T. Dilger, M. Mezzennanza, C. Ploder, and R. Bernsteiner, "Leverage the COBIT® 2019 Design Toolkit in an SME Context: A Multiple Case Study," *Economies of the Balkan and Eastern European Countries (EBECC)*, vol. 2023, pp. 73–101, Feb. 2023. [En línea]. DOI: 10.18502/kss.v8i1.12636.
- [18] R. Hernández Sampieri, C. Fernández y Pilar Baptista, *Metodología de la Investigación*, Mexico DF: McGraw-Hill, 2006.
- [19] ISACA, *COBIT® 2019 Guía de diseño: Diseño de una solución de Gobierno de Información y Tecnología*, Illinois, EE.UU.: ISACA, 2019.
- [20] ISACA, *COBIT® 2019 Guía de Implementación: Implementación y optimización de una solución de Gobierno de Información y Tecnología*, Illinois, EE.UU.: ISACA, 2019.
- [21] *Sistemas de gestión de la seguridad de la información - Requisitos*, INTE/ISO/IEC 27001:2014, Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2014.

- [22] *Código de buenas prácticas para controles de seguridad de la información, INTE/ISO/IEC 27002:2016, Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2016.*
- [23] *Técnicas de seguridad – Gobernanza de seguridad de la información, INTE/ISO/IEC 27014:2016, Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2016.*
- [24] C. d. R. CONRE-UNED. "ORIENTACIONES GENERALES PARA LA IMPLEMENTACION DEL SISTEMA ESPECIFICO DE VALORACIÓN DE RIESGO INSTITUCIONAL (SEVRI) EN LA UNED". <https://www.uned.ac.cr/planificacion/proci/documentos-institucionales>. Accedido el 20 de junio de 2025. [En línea]. Disponible: https://www.uned.ac.cr/planificacion/proci/images/VR/Orientaciones_SEVRI_UNED_2023.pdf
- [25] ISACA, "CMMI Model Quick Reference Guide CMMI V3.0", 24 de octubre de 2024, CMMI-Model-Quick-Reference-Guide_Digital-1024, Illinois, United States of America, An overview of the Capability Maturity Model Integration (CMMI)® Model. Accedido el 20 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.isaca.org/resources/reference-guide/cmmi-model-quick-reference-guide>
- [26] C. U. UNED. "Política de gestión del riesgo y continuidad de los servicios en la UNED". <https://www.uned.ac.cr/docencia/cidreb/cidi/normativa-universitaria/politicas-institucionales>. Accedido el 20 de junio de 2025. [En línea]. Disponible: https://www.uned.ac.cr/docencia/images/Normativa/Política_gestión_riesgo_continuidad_servicios_UNED_200624.pdf
- [27] *Security and resilience – Business continuity management systems – Requirements, ISO 22301:2019, International Organization for Standardization, 2019.*
- [28] *Information technology – Service management system requirements (Part 1) – especificación de requisitos para SMS, ISO/IEC 200001:2018, International Organization for Standardization (ISO) / International Electrotechnical Commission (IEC), 2018.*
- [29] Dirección de Tecnología de Información y Comunicaciones (DTIC), *DTIC UIT F01 Plan para la gestión de la capacidad de la Infraestructura TI*, Unidad de Infraestructura Tecnológica (UIT), Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica (UNED), San José, Costa Rica, 13 de febrero de 2025. [Documento interno, no publicado].

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 rayos gamma para la producción de mutantes de *Echeveria* sp. para potenciar el futuro beneficio del productor nacional

Use of gamma rays to produce *Echeveria* sp. mutants to boost the future profit of the national producer

Girlany Quesada-Cordero¹, Frank Carlos Barrientos-Alfaro², Walter Vargas-Segura³, Jason Pérez⁴

Fecha de recepción: 22 de noviembre, 2024
Fecha de aprobación: 17 de marzo, 2025

Quesada-Cordero, G; Barrientos-Alfaro, F.C; Vargas-Segura, W; Pérez, J. Uso de rayos gamma para la producción de mutantes de *Echeveria* sp. Para potenciar el futuro beneficio del productor nacional. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 87-98.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7593>

1 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

 girlanyquesada02@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-0641-0334>

2 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

 fbarrientos@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-8961-4110>

3 Laboratorio de Irradiación Gamma, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

 walvargas@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-2434-1945>

4 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

 jasperez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-8267-4978>



Palabras clave

Biotecnología; energía atómica; mutación; radiación; recursos vegetales.

Resumen

El mejoramiento genético vía mutagénesis radioinducida es un método eficaz para aumentar la variabilidad en plantas, permitiendo inducir características deseadas ausentes en la naturaleza o pérdidas durante la evolución o procesos de mejoramiento genético. Esta investigación se desarrolló con el objetivo de producir líneas mutantes de *Echeveria* sp. utilizando rayos gamma, con el fin de optimizar protocolos necesarios para ofrecer más opciones y variedad en el mercado de suculentas en Costa Rica. Se demostró que el tratamiento de desinfección con incubación por 20 min en NaOCl, presentó un 46.9 % de explantes asépticos. El medio con 50 % de sales MS y 6 g.L⁻¹ de gelificante resultó ser el más efectivo para la multiplicación y la reducción de la hiperhidridad en los explantes. Hojas de vitroplantas de *Echeveria* sp. fueron tratadas con dosis de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 Gy de radiación gamma. Se determinó que la DL₅₀ para hojas de vitroplantas corresponde a 23.16 Gy. Posteriormente, los explantes irradiados fueron subcultivados en el medio de multiplicación para inducir su brotación y después de 6 subcultivos, fueron aclimatadas en invernadero. Los protocolos de irradiación y micropropagación de *Echeveria* sp. demostraron ser eficaces, ofreciendo un valioso recurso para el mejoramiento genético de la especie y facilitando la transferencia de nuevas variedades a los productores de plantas ornamentales.

Keywords

Atomic energy; biotechnology; mutation; radiation; plant resources.

Abstract

Radioinduced mutagenesis is a powerful tool for enhancing genetic variability in plants, enabling the induction of desired traits, absent in nature or lost through evolution and breeding. This study aimed to generate mutant lines of *Echeveria* sp. using gamma rays, expanding the variety of succulents available in Costa Rica. A disinfection treatment using 20 min of incubation in NaOCl resulted in 46.9 % aseptic explants. The medium containing 50 % MS salts and 6 g.L⁻¹ of gelling agent proved to be the most effective for explant multiplication and hyperhydricity reduction. Leaves from *Echeveria* sp. vitroplants were exposed to gamma radiation doses of 0, 20, 40, 60, 80 and 100 Gy. The LD₅₀ for vitroplant leaves was determined to be 23.16 Gy. Irradiated explants were subcultured in multiplication medium to promote sprouting and, after six subcultures, successfully acclimatized in greenhouse conditions. The established irradiation and micropropagation protocols proved to be effective for mutation induction in *Echeveria* sp., offering an innovative resource for developing new ornamental varieties and supporting their adoption by succulent producers.

Introducción

Echeveria sp. es un género de plantas perennes y suculentas pertenecientes a la familia Crassulaceae, cuyo centro de origen radica en el continente americano [1]. Dada su relevancia ornamental, las plantas de este género han experimentado un crecimiento significativo en términos de mercado [2]. Su atractivo visual, facilidad de cuidado y diversidad de formas y colores, las convierten en una opción popular para hogares y negocios [2]. Dado esto, la demanda de nuevas variedades con características únicas y distintivas sigue creciendo [2].

El mejoramiento genético vía mutagénesis radioinducida es un método eficaz para obtener mayor variabilidad genética en plantas [3]. Adicionalmente, es descrita como una herramienta valiosa para obtener nuevas variedades con características únicas y distintivas que satisfagan la creciente demanda del mercado [4]. Esta técnica permite inducir características deseadas que no se pueden encontrar en la naturaleza o se han perdido durante el proceso evolutivo, de domesticación o de mejoramiento genético convencional [5]. Dentro de dichos rasgos destacan la resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a condiciones ambientales adversas y mayor vigorosidad de crecimiento; así como cambios en patrones de coloración y aumento en el número de hijuelos [3].

Posterior al proceso de mutagénesis, se debe realizar la selección de los genotipos de interés. Para este propósito, el cultivo de tejidos ha sido una biotecnología de excepcional utilidad, ya que en un espacio reducido y en condiciones controladas, se han desarrollado investigaciones para el mejoramiento genético en múltiples especies como *E. runyonii*, *E. derembergii* y el híbrido Perle von Nürnberg (*E. gibbiflora* × *elegans*) [4]. Así, los terrenos, mano de obra e insumos que se deben utilizar para la evaluación de los mutantes, pueden liberarse para la producción en campo [6].

Previamente, estudios en *Echeveria* sp. han explorado el uso de distintas biotecnologías. En el caso de *E. purhepecha*, se ha estudiado su mejoramiento genético a través del cultivo *in vitro* como herramienta de conservación [7]. Esta especie endémica de Michoacán, México enfrenta riesgos debido al cambio de uso de suelo [7]. La biotecnología, en este contexto, se ha empleado mediante técnicas de organogénesis directa con reguladores de crecimiento, como la 6-bencilaminopurina (6-BAP) y el ácido indolacético (AIA), logrando acelerar la tasa de propagación y manteniendo las plantas libres de patógenos [7]. Por otra parte, en la especie en peligro de extinción *E. laui*, se trabajó en la optimización de las condiciones para la morfogénesis *in vitro* [8]. Mediante el uso de técnicas de cultivo de tejidos, se logró una exitosa germinación, inducción de brotes y enraizamiento, con una alta tasa de supervivencia durante la aclimatación [8].

El mejoramiento genético por inducción de mutaciones en *Echeveria* sp. permite generar beneficios para los productores costarricenses de especies ornamentales, incluyendo aumento en la rentabilidad, el fortalecimiento del sector agroindustrial y la posición de Costa Rica como referente en la producción de plantas de alta calidad [9]. Por estas razones, contar con nuevas variedades de plantas con características únicas, que puedan contrarrestar los problemas agronómicos y con mayor variedad en colores, tamaños y formas exóticas representa un estímulo para los productores y los clientes.

Contribuir a satisfacer estas y otras de las necesidades de los productores de plantas ornamentales es parte de la misión de las universidades públicas como el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), que cuenta con instalaciones, equipos y profesionales capacitados para producir aportes de este tipo. Dado lo descrito, la presente investigación se llevó a cabo con el objetivo de producir líneas mutantes de *Echeveria* sp. en condiciones *in vitro*, mediante la inducción de mutaciones empleando radiación gamma, como una primera etapa en la diversificación de la oferta de plantas ornamentales en Costa Rica, reduciendo la dependencia de la importación de variedades desarrolladas en otros países.

Materiales y métodos

A continuación, se describen los métodos utilizados para la desinfección, cultivo *in vitro* e irradiación de material vegetal de *Echeveria* sp. proveniente del invernadero. Asimismo, se describen las condiciones para la multiplicación y aclimatación de plantas mutantes obtenidas a partir del material irradiado. En la Figura 1, se muestra un esquema general de la metodología ejecutada en la presente investigación.

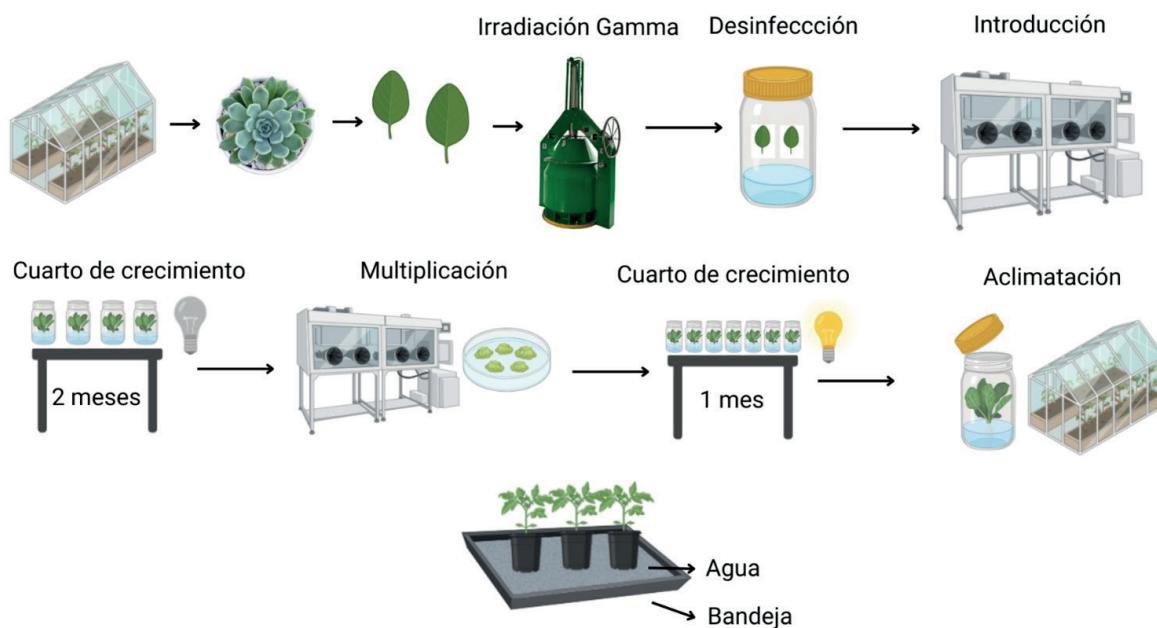


Figura 1. Esquema general de la metodología desarrollada para la producción de líneas mutantes de *Echeveria* sp. Elaborado con Biorender.com.

Establecimiento *in vitro*.

Los ensayos desarrollados para la optimización de la desinfección de hojas de *Echeveria* sp. para su establecimiento *in vitro* se basaron en el protocolo descrito por Ayala-González & Obledo-Vázquez [7], con algunas modificaciones que se detallan a continuación. En el tratamiento de desinfección 1 (TD1), las hojas fueron lavadas con una solución de jabón líquido al 1 % (v.v⁻¹), hasta quitar la pruina de la superficie foliar. Posteriormente, se enjuagaron 3 veces con agua destilada y fueron sumergidas en una solución de 70 % (v.v⁻¹) etanol durante 5 minutos en agitación orbital constante. Después de ser enjuagadas nuevamente 3 veces con agua destilada, las hojas fueron incubadas en la solución de Afungil 50 WP®, Agri-mycin 16,5 WP® y Zetaran 76 WP® (4 g.L⁻¹ de cada uno) durante 15 minutos. Enseguida, se realizaron 3 enjuagues con agua destilada. Después, los explantes fueron transferidos a cámara de flujo laminar, donde se colocaron en la solución 1 % (v.v⁻¹) NaOCl por 10 minutos. Finalmente, los explantes fueron enjuagados 3 veces con agua destilada estéril.

Para el tratamiento de desinfección 2 (TD2), se emplearon las mismas soluciones desinfectantes (mismas concentraciones) y el mismo orden seguido en tratamiento TD1; sin embargo, los tiempos de incubación en cada solución se duplicó.

Después de la desinfección, los explantes fueron cultivados en un medio compuesto, por los macro y micronutrientes descritos por Murashige & Skoog (MS) [10], las vitaminas B5 [11], 3 % (m.v⁻¹) de sacarosa, 2 mg.L⁻¹ de 6-bencilaminopurina (6-BAP) y se agregó 1 mg.L⁻¹ de ácido indol-3-butírico (AIB). Todos estos reactivos fueron provistos por PhytoTech Labs® (Lenexa, Kansas, Estados Unidos). El pH del medio fue ajustado a 5.70, empleando HCl 1 N o NaOH 1 N, según fuera requerido, y este fue gelificado mediante la adición de 3 g.L⁻¹ de Gellan Gum® (Plant Cell Technology, Washington D.C., Estados Unidos), antes de la esterilización por calor húmedo en autoclave (121 °C, 1.2 atm por 30 min). Los cultivos fueron mantenidos en condiciones de luz con 18 µmol.s⁻¹.m⁻² de intensidad con un fotoperiodo de 16 h de luz, a 25 ± 2 °C, durante dos meses.

La efectividad de los tratamientos de desinfección fue evaluada después de 30 días, contabilizando el número de explantes asépticos. Para cada tratamiento fueron evaluadas 20 muestras, seleccionadas independiente y aleatoriamente. Los datos obtenidos fueron analizados mediante una prueba Chi Cuadrado, evaluando la significancia del tratamiento de desinfección evaluado. Este análisis fue realizado considerando un umbral de confianza del 95 %.

Multiplicación

Este experimento se estableció para disminuir la hiperhidrididad mostrada durante el cultivo *in vitro* de las plantas de *Echeveria* sp. Los explantes previamente establecidos regeneraron plantas a partir de los segmentos de hoja desinfectados. Para la multiplicación, brotes laterales fueron cultivados en dos medios de diferente composición. La composición del primer medio (MM1) consistió en las sales MS [10] y las vitaminas B5 [11] suplementado con 40 g.L⁻¹ de sacarosa. Estos reactivos fueron provistos por PhytoTech Labs® (Lenexa, Kansas, Estados Unidos). Por otra parte, el segundo medio (MM2) se preparó utilizando 50 % de las sales MS [10] y de las vitaminas B5 [11] suplementado con 40 g.L⁻¹ de sacarosa. El pH de ambos medios fue ajustado a 5.70 empleando HCl 1 N o NaOH 1 N, según se requiriera y estos fueron gelificados mediante la adición de 3 y 6 g.L⁻¹ de Gellan Gum® (Plant Cell Technology, Washington D.C., Estados Unidos), respectivamente, previo a la esterilización en autoclave a 121°C, 1.2 atm por 30 min. Los cultivos fueron multiplicados cada 4 semanas durante 24 semanas y se mantuvieron a 25 ± 2 °C y con una iluminación de 72 µmol.s⁻¹.m⁻² con un fotoperiodo de 16 h de luz.

Después de 16 semanas, se procedió a evaluar la tasa de sobrevivencia del material vegetal tras su cultivo en los dos medios previamente descritos. Para determinar si la composición de los medios de cultivo generó un efecto significativo sobre dicha variable de respuesta se realizó una prueba de Chi cuadrado. Dicha prueba se llevó a cabo considerando un umbral de confianza del 95 %.

Irradiación

Posterior a la optimización del protocolo de desinfección y multiplicación, se procedió con la etapa de mutagénesis. Hojas de *Echeveria* sp. provenientes de material *in vitro*, fueron irradiadas en el sistema de irradiación gamma tipo Ob-Servo Ignis (Institute of Isotopes Co, Ltd, Budapest, Hungría) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR, Figura 2). Este material fue expuesto a dosis de radiación gamma de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 Gy. Posterior a la irradiación, el material vegetal se mantuvo a 25 ± 2 °C, en condiciones de oscuridad por 30 días. Transcurrido dicho período, el material fue subcultivado en el medio MM2 (optimizado en la etapa anterior) y colocado a 25 ± 2 °C, bajo una irradiancia de de 72 µmol.s⁻¹.m⁻² con un fotoperiodo de 16 h de luz.



Figura 2. Sistema de irradiación gamma tipo Ob-Servo Ignis del Laboratorio de Irradiación Gamma del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

Cuatro semanas después del subcultivo del material irradiado se evaluó la sobrevivencia, considerando que el explante era sobreviviente cuando mantenía su coloración, sin signos de necrosis. Este experimento fue analizado en un diseño completamente al azar (DCA), correspondiendo al factor evaluado la dosis de irradiación. Cada tratamiento correspondiente a las dosis de irradiación consistió en 10 muestras, seleccionadas independiente y aleatoriamente. Los datos obtenidos fueron analizados mediante ajustes de modelo lineal generalizado (GLM) con una distribución binomial y una función de enlace de tipo logit, con el fin de determinar la dosis letal media (DL_{50}) de radiación gamma para hojas de *Echeveria* sp.

Aclimatación

Después de 6 ciclos de multiplicación se alcanzó, la población M1V6 que consistió en 4900 individuos, se llevó a cabo la aclimatación de los mutantes putativos a condiciones *ex vitro*. Inicialmente, los frascos que contenían las plantas fueron trasladados al invernadero y durante los primeros tres días, los frascos se mantuvieron cerrados con sus respectivas tapas.

Posteriormente, se retiraron las tapas de los frascos, exponiendo directamente las plantas al ambiente del invernadero por tres días adicionales. Al concluir los seis días de aclimatación progresiva, los explantes se transfirieron cuidadosamente a macetas de plástico con sustrato compuesto por una mezcla de tierra abonada y turba. Con el fin de mantener niveles óptimos de humedad y temperatura, se colocó un recipiente de plástico transparente invertido sobre cada maceta. Adicionalmente, las macetas se colocaron en bandejas con agua, permitiendo un suministro continuo y constante de humedad por capilaridad.

Resultados

Desinfección y establecimiento *in vitro*

Cuatro semanas después del establecimiento *in vitro* de hojas de *Echeveria* sp. provenientes de invernadero, se evaluó la efectividad de los dos tratamientos de desinfección. Se observó que el tratamiento TD2, con tiempos de incubación más prolongados, presentó una menor tasa de contaminación (53.12 %), en comparación con TD1 que presentó un 71.88 % de explantes contaminados (Figura 3). Aunque la diferencia entre los tratamientos no fue estadísticamente significativa de acuerdo con la prueba Chi Cuadrado, el uso de TD2 resultó más adecuado para reducir la contaminación en condiciones similares.

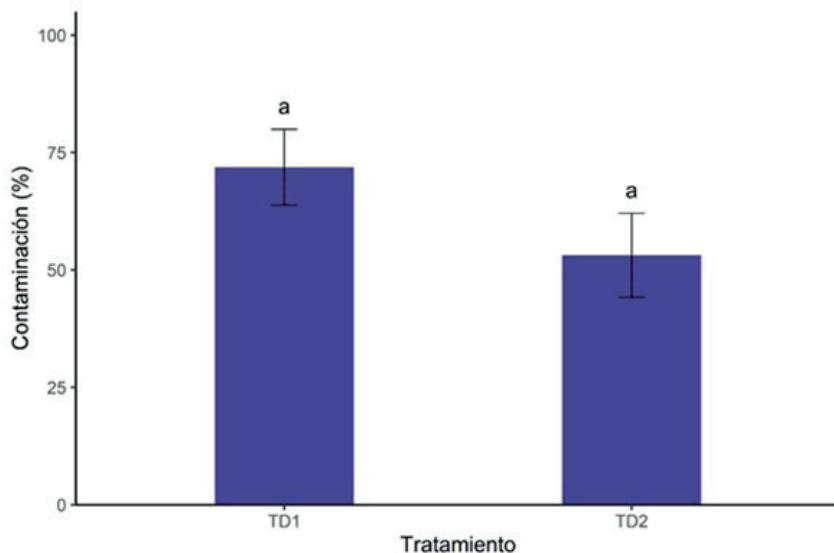


Figura 3. Respuesta de hojas de *Echeveria* sp. provenientes de plantas de invernadero cuatro semanas después de la exposición a dos tratamientos de desinfección. Las medidas con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) de acuerdo con la prueba Chi Cuadrado. TD1: etanol al 70 % por 5 minutos, fungicidas (Afungil 50 WP®, Agri-mycin 16,5 WP® y Zetaran 76 WP®) a 4 g/L cada uno durante 15 minutos, 1 % NaOCl durante 10 minutos. TD2: Se utilizaron las mismas soluciones y concentraciones, pero los tiempos de incubación fueron duplicados en comparación con T1.

Multiplicación de las líneas mutantes

En la evaluación de los medios de multiplicación, la sobrevivencia de las plántulas fue significativamente mayor al emplear el medio con el 50 % de nutrientes y vitaminas (MM2), con una tasa de sobrevivencia del 86.67 % de los explantes (Figura 4). Por otra parte, al emplear el medio de multiplicación con el 100 % de nutrientes y vitaminas (MM1), únicamente el 33.33 % de los explantes sobrevivieron (Figura 4). Las vitroplantas de *Echeveria* sp. mostraron un desarrollo adecuado, con altas tasas de brotación y ausencia de tejidos hiperhidratados en el cultivo en MM2 (Figura 5), siendo un medio de cultivo efectivo para promover el desarrollo de nuevos brotes en la etapa de multiplicación. Estos resultados destacan la superioridad del medio con el 50 % de los nutrientes para promover la sobrevivencia en *Echeveria* sp., sugiriendo una composición más adecuada para el desarrollo del material vegetal.

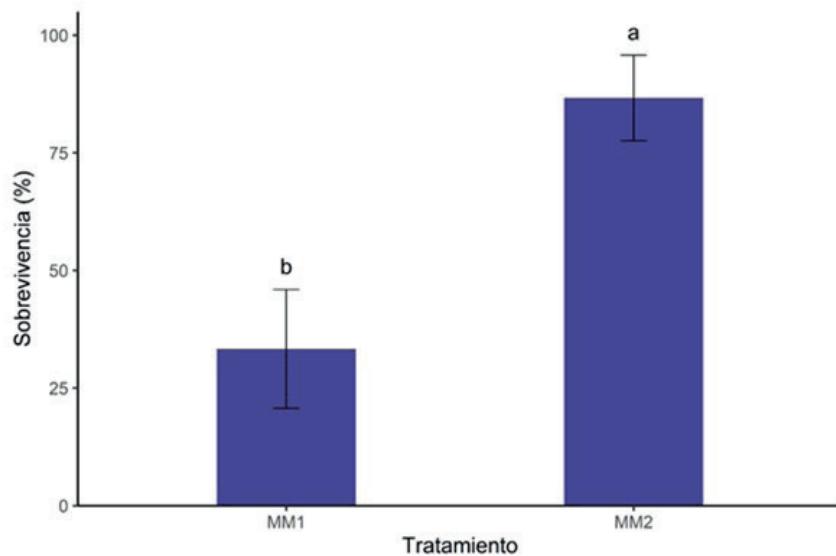


Figura 4. Efecto de la formulación del medio de cultivo durante la fase de multiplicación en la sobrevivencia de vitroplantas de *Echeveria* sp. después de 16 semanas de cultivo. Las medias con la misma letra no presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$), según la prueba Chi Cuadrado.



Figura 5. Vitroplantas mutantes de *Echeveria* sp. producidas tras la exposición a 20 Gy de radiación gamma. Evaluación realizada después de 16 semanas de cultivo en el medio de multiplicación MM2.

Irradiación

En este experimento, se observó que las hojas de *Echeveria* sp. presentaron una sobrevivencia máxima promedio del 70 % en el tratamiento control (0 Gy) y 20 Gy. Por otra parte, los tratamientos expuestos a dosis superiores a 80 Gy presentaron una mortalidad del 100 % (datos no mostrados). A partir del ajuste del modelo de regresión en los datos obtenidos, se determinó que la dosis letal media (DL_{50}) de radiación gamma para las hojas de vitroplantas de *Echeveria* sp. corresponde a 23.16 Gy (Cuadro 1).

Cuadro 1. Radiosensibilidad del tejido foliar de vitroplantas de *Echeveria* sp. 4 semanas posterior a la exposición a diferentes dosis de radiación gamma, determinado mediante el ajuste de modelo de regresión logístico para la variable sobrevida.

Modelo de dosis letal	Dosis determinada (Gy)	Límite inferior (Gy)	Límite superior (Gy)
DL ₂₅	14.00	0.89	28.27
DL ₅₀	23.16	9.66	36.36
DL ₇₅	32.33	18.43	44.45

Por otra parte, en la Figura 6 se presenta una comparación, durante la etapa de multiplicación, entre una vitroplanta de *Echeveria* sp. proveniente de tejidos sin irradiar (Figura 6A) y una planta regenerada a partir de material expuesto a 20 Gy de radiación gamma (Figura 6B). Obsérvese la diferencia entre ambas plantas respecto a la elongación y color de las hojas.

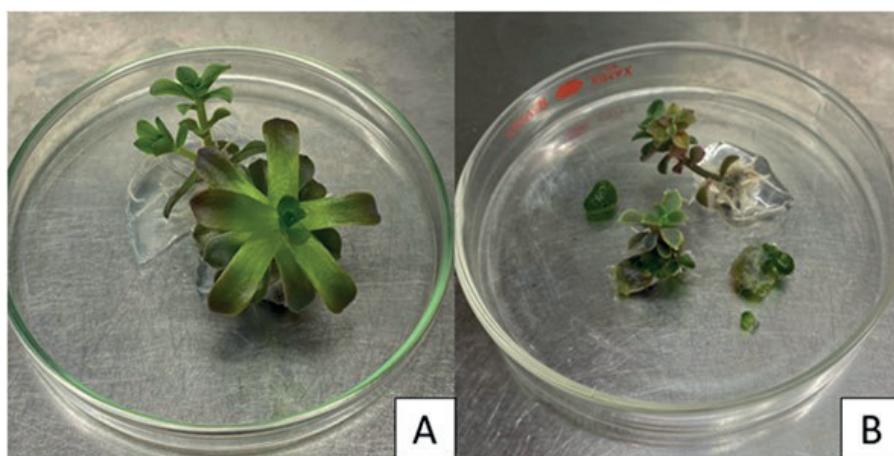


Figura 6. Comparación entre una vitroplanta no irradiada de *Echeveria* sp. (A) y una línea regenerada a partir de tejido vegetal expuesto a 20 Gy de radiación gamma (B).

Aclimatación de líneas mutantes de *Echeveria* sp.

En la Figura 7 se muestra una línea mutante de *Echeveria* sp. obtenida tras la exposición de material vegetal a 20 Gy de radiación gamma, después de 6 subcultivos *in vitro*, y 24 semanas posterior a la siembra en condiciones de invernadero.



Figura 7. Planta de *Echeveria* sp. obtenida tras la exposición de material vegetal a 20 Gy de radiación gamma.

Discusión

De acuerdo con Kim *et al.* [12], el tiempo de exposición es un factor crucial en cualquier procedimiento de desinfección. Deng *et al.* [13] señalan que un mayor tiempo de exposición del material vegetal a agentes desinfectantes, disminuye la carga microbiana, mejorando la eficacia del tratamiento. En el caso de la solución de etanol al 70 % (v.v⁻¹), el estudio de Uchikawa Graziano *et al.* [14] indica que este actúa rápidamente, desnaturizando proteínas y disolviendo lípidos, lo que conlleva a la destrucción de la membrana celular de diversos microorganismos.

Por otra parte, el uso de agroquímicos especializados es otro aspecto clave que diferencia significativamente TD2 de TD1. La solución de agroquímicos compuesta por Afungil 50 WP®, Agri-mycin 16,5 WP® y Zetaran 76 WP® actúa de manera conjunta contra una amplia gama de hongos y bacterias que pueden ser resistentes a los desinfectantes comunes como el alcohol y el cloro [15]. Estos aseguran una desinfección más profunda y efectiva. Por otra parte, el hipoclorito de sodio (NaOCl) es un desinfectante potente y su aplicación prolongada asegura la eliminación de cualquier microorganismo. De acuerdo con Ali & Mahmood [16], este desinfectante actúa oxidando componentes celulares esenciales de los microorganismos. La mayor duración de la exposición en TD2 maximiza esta acción oxidativa, asegurando una mayor asepsia en los explantes.

De acuerdo con Murashige & Skoog [10], una concentración menor de sales puede ser ventajosa, pues un exceso de nutrientes puede llevar a problemas como la hiperhidratación, el cual se observó en los brotes emergentes durante el establecimiento *in vitro*. De acuerdo con Indacochea *et al.* [17], este fenómeno se debe a una absorción excesiva de agua facilitada por un exceso de sales y minerales en el medio de cultivo. Esto puede ser contrarrestado mediante una reducción en la concentración de los mismos, tal como se formuló en MM2. Asimismo, una mayor concentración de gelificante forma una matriz de gel más sólida y estable, proporcionando soporte físico a las raíces de las plantas. De acuerdo con Polivanova & Bedarev [18], esto no solo mejora el desarrollo radicular, sino que también ayuda a mitigar problemas como la hiperhidratación al regular mejor el potencial hídrico del medio.

Al trazar la curva de radiosensibilidad para hojas de vitroplantas de *Echeveria* sp., se evidenció la existencia de una relación inversamente proporcional entre la dosis de radiación y la tasa de sobrevivencia de los explantes irradiados. Esto se puede explicar con base en que dosis superiores de radiación, causan en los explantes mayor estrés oxidativo, y aumento en la tasa de efectos directos en el ADN, proteínas y membranas, entre otros [19]. Este proceso daña gravemente las células vegetales y afectar negativamente su capacidad de regeneración y crecimiento [19, 20]. Dado que la tasa de sobrevivencia del material expuesto a 20 Gy y el tratamiento control presentaron el mismo valor, se sugiere que esta dosis proporciona un nivel de radiación suficiente para inducir cambios sin causar un daño excesivo a las células vegetales.

Finalmente, la aclimatación de las plantas después del cultivo *in vitro* es un proceso crítico que determina el éxito de su adaptación al entorno natural. De acuerdo con Genoud *et al.* [21], esto permite minimizar el choque ambiental, permitiendo que los explantes se adapten gradualmente a las condiciones externas, incluyendo variaciones en temperatura, humedad y luz. Marín [22] señala que retirar las tapas de los frascos, exponiendo directamente las plantas al ambiente del invernadero, permite fortalecer la resistencia de los explantes, incrementando su capacidad para manejar el estrés ambiental. Asimismo, la exposición gradual a las nuevas condiciones es esencial para que las plantas ajusten sus mecanismos fisiológicos y se preparen para un entorno menos controlado.

Conclusiones

Dado su mayor tiempo de exposición a los agentes desinfectantes, el tratamiento de desinfección 2 (TD2) resultó ser más efectivo que TD1, lo que aumenta la cantidad de explantes establecidos *in vitro*, disminuyendo la carga microbiana en los mismos. Esta etapa es crucial para mantener la sanidad de los explantes durante su establecimiento *in vitro*. Asimismo, se determinó que una concentración menor de sales y mayor concentración de gelificante en el medio utilizado para la multiplicación de vitroplantas de *Echeveria* sp. (MM2) presenta ventajas significativas en el proceso. Esta formulación proporciona un entorno más equilibrado, reduciendo el riesgo de hiperhidratación e incrementando la tasa de sobrevivencia del material vegetal. Finalmente, se determinó que la dosis letal media (DL_{50}) de radiación gamma para hojas de vitroplantas de *Echeveria* sp. corresponde a 23.16 Gy, estableciendo esta medida como un valor crítico para la supervivencia. La dosis de 20 Gy fue identificada como la más adecuada, logrando la máxima eficacia al disminuir la necrosis, que se intensificó con dosis superiores.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto «Uso de rayos gamma para la producción de mutantes de *Echeveria* sp. para potenciar el futuro beneficio del productor nacional».

Referencias

- [1] G. Palomino, J. Martínez-Ramón, V. Cepeda-Cornejo, M. Ladd-Otero, P. Romero y J. Reyes-Santiago, "Chromosome number, ploidy level, and nuclear DNA content in 23 species of *Echeveria* (Crassulaceae)", *Genes*, vol. 12, no. 12, pp. 1-25, 2021. <https://doi.org/10.3390/genes12121950>
- [2] C. O. Morales, "Origen, historia natural y usos de las plantas introducidas en Costa Rica", *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 12, no. 2, pp. 1-125, 2020. <http://dx.doi.org/10.22458/urj.v12i2.3098>
- [3] Y. Oladosu *et al.*, "Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: A review", *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, vol. 30, no. 1, pp. 1-16, 2016. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>
- [4] A. Zúñiga Orozco y A. Carrodeguas González, "Echeveria (Crassulaceae): Potencial para la mejora genética como ornamental", *Avances en Investigación Agropecuaria*, vol. 25, no. 3, pp. 58-81, 2021. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.21.25.16>
- [5] F. J. Novak y H. Brunner, "Fitotecnia: Tecnología de mutación inducida para el mejoramiento de los cultivos", *Boletín de OIEA*, vol. 4, pp. 25-33., 1992.
- [6] H. Alfaro, "Research aims to increase crop drought tolerance using biotechnology", 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.unr.edu/nevada-today/news/2021/john-cushman-grant>. [Accesado May. 21, 2024].
- [7] C. Ayala-González y E. N. Obledo-Vázquez, "Comparación de la tasa de propagación *in vitro* y *ex vitro* de la especie endémica de Michoacán, *Echeveria purhepecha*", XII Encuentro de la Participación de la Mujer en la Ciencia, 2015, pp. 1-7.
- [8] M. G. Godoy Beltrán, "Morfogénesis *in vitro* de *Echeveria laui* Moran & Meyrán", Tesis de maestría, Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México, 2021.
- [9] S. Hernández-Muñoz, M. Pedraza-Santos, P. A. López, J. Gómez-Sanabria y J. Morales-García, "Mutagenesis in the improvement of ornamental plants", *Revista Chapingo - Serie Horticultura*, vol. 25, no. 3, pp. 151-167, 2019. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.12.022>
- [10] T. Murashige y F. Skoog, "A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures", *Physiologia Plantarum*, vol. 15, no. 3, pp. 473-497, 1962. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>
- [11] L. Gamborg, A. Miller y K. Ojima, "Nutrient requirements of suspension cultures of soybean root cells", *Experimental Cell Research*, vol. 50, no. 1, pp. 151-158, 1968. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(68\)90403-5](https://doi.org/10.1016/0014-4827(68)90403-5)
- [12] D. H. Kim, J. Gopal y I. Sivanesan, "Nanomaterials in plant tissue culture: The disclosed and undisclosed", *RSC Advances*, vol. 7, pp. 36492-36505, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7RA07025J>

- [13] L. -Z. Deng *et al.*, "Emerging chemical and physical disinfection technologies of fruits and vegetables: A comprehensive review", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 60, no. 15, pp. 2481-2508, 2020. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1649633>
- [14] M. Uchikawa Graziano, K. Uchikawa Graziano, F. Morais Gomes Pinto, C. Quartim de Moraes Bruna, R. Queiroz de Souza y C. A. Lascala, "Eficacia de la desinfección con alcohol al 70% (p/v) de superficies contaminadas sin limpieza previa", *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, vol. 21, no. 2, pp. 1-6, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0104-11692013000200020>
- [15] Subdirección de Salud Ambiental, "Reducción de riesgos asociados al uso de productos plaguicidas y desinfectantes", 2020. [Online]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/abece-plaguicidas-desinfectantes.pdf>. [Accesado May. 27, 2024].
- [16] S. N. Ali y R. Mahmood, "Sodium chlorite increases production of reactive oxygen species that impair the antioxidant system and cause morphological changes in human erythrocytes", *Environmental Toxicology*, vol. 32, no. 4, pp. 1343-1353, 2017. <https://doi.org/10.1002/tox.22328>
- [17] B. Indacochea *et al.*, "Evaluación de medios de cultivo In vitro para especies forestales nativas en peligro de extinción en Ecuador", *Agronomía Costarricense*, vol. 42, no. 1, pp. 63-89, 2018. ISSN: 0377-9424.
- [18] O. B. Polivanova y V. A. Bedarev, "Hyperhydricity in plant tissue culture", *Plants*, vol. 11, no. 23, pp. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11233313>
- [19] D. Kiani, A. Borzouei, S. Ramezanour, H. Soltanloo y S. Saadati, "Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents", *Scientific Reports*, vol. 12, pp. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14949-6>
- [20] S. Penna y S. G. Bhagwat, "Mutagenesis and selection: Reflections on the *in vivo* and *in vitro* approaches for mutant development" en *Mutation Breeding for Sustainable Food Production and Climate Resilience*, S. Penna y S. M. Jain, Eds. Singapore: Springer, 2023, pp. 99-127. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9720-3_4
- [21] C. Genoud-Gourichon, H. Sallanon y A. Coudret, "Effect of sucrose, agar, irradiance and CO₂ concentration during rooting phase on the acclimation of *Rosa hybrida* plantlets to *ex vitro* conditions", *Photosynthetica*, 32(2), 263-270, 1996. ISSN: 0300-3604.
- [22] J. Marín, "High survival rates during acclimatization of micropropagated fruit tree rootstocks by increasing exposures to low relative humidity", *Acta Horticulturae*, vol. 616, pp. 139-142, 2003. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.616.13>

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.

Revisión de la contaminación por microplásticos: una descripción del impacto en la salud humana

Review of microplastic pollution: a description of the impact on human health

Daniela Santamaría-Villalobos¹, Karol Jineth Sanchez-Matallana², Jovanna Acero-Godoy³

Fecha de recepción: 28 de noviembre, 2024

Fecha de aprobación: 28 de febrero, 2025

Santamaría-Villalobos, D; Sanchez-Matallana, K.J; Acero-Godoy, J. Revisión de la contaminación por microplásticos: una descripción del impacto en la salud humana. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 99-120.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7600>

1 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Colombia.

 dsantamariav@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0005-3422-1295>

2 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Colombia.

 kjinethsanchez@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0004-8797-8921>

3 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Colombia.

 jacerog@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-1656-6888>



Palabras clave

Contaminante emergente; efecto nocivo; microplásticos; nanoplásticos; salud humana; vías de asimilación.

Resumen

La producción de plástico en la actualidad es desmesurada, hecho que suscita un desafío medioambiental y de salud pública, dada la formación de pequeñas partículas de plástico como resultado de procesos de desintegración mecánica y térmica. Estas partículas, denominadas micro y nanoplásticos, han sido encontradas casi de manera ubicua en el suelo y el agua, y, en consecuencia, también en humanos. El presente artículo tiene como objetivo revisar los efectos nocivos de los micro y nanoplásticos en la salud humana, por lo cual se realizó una revisión de literatura siguiendo los pasos de una scoping review, mediante la búsqueda de artículos científicos en las bases de datos Web of Science, Nature, PubMed y Scopus. Se recolectaron 75 documentos que cumplen con los criterios de inclusión y exclusión propuestos. De esta revisión se constata la presencia de microplásticos en el cuerpo humano, los cuales ingresan mediante la ingestión y la inhalación. Su presencia genera efectos adversos, incluyendo inflamación, estrés oxidativo y acumulación en tejidos, que conllevan implicaciones para la salud. Aunque se han identificado riesgos para la salud humana, existen vacíos en el análisis de los efectos a largo plazo, en el estudio de la exposición a estas partículas de acuerdo con el sitio geográfico y en la estandarización de los métodos. Por tanto, es relevante investigar acerca del impacto de los micro y nanoplásticos, con el fin de profundizar en el análisis y aplicación de medidas preventivas.

Keywords

Emerging contaminant; harmful effect; human health; microplastics; nanoplastics; routes of assimilation.

Abstract

The current production of plastic is excessive, a fact that poses an environmental and public health challenge due to the formation of small plastic particles resulting from mechanical and thermal disintegration processes. These particles, known as micro- and nanoplastics, have been found almost ubiquitously in soil and water, and consequently, also in humans. This article aims to review the harmful effects of micro- and nanoplastics on human health. For this purpose, a literature review was carried out following the steps of a scoping review, through a search for scientific articles in the databases Web of Science, Nature, PubMed, and Scopus. A total of 75 documents that met the proposed inclusion and exclusion criteria were collected. This review confirms the presence of microplastics in the human body, which enter mainly through ingestion and inhalation. Their presence generates adverse effects in the body, including inflammation, oxidative stress, and accumulation in tissues, which could have implications for health. Although potential risks to human health have been identified, there are gaps in the analysis of long-term effects, as well as in the in-depth study of exposure to these particles according to geographic location and in the standardization of certain methods. Therefore, it is relevant to investigate the impact of micro- and nanoplastics in order to explore possible preventive measures.

Introducción

En las sociedades contemporáneas, durante la última década se ha incrementado abismalmente a nivel global el uso de plásticos, debido a su fácil producción y a los bajos costos asociados [1]. Particularmente, dada su aplicación a productos de un solo uso. La utilización excesiva del plástico, sumado a su longevidad, y, a la casi nula gestión de reciclaje, desencadenan una proliferación masiva de contaminación plástica que suscita una alarma ambiental en aumento. De acuerdo con los datos de la Organización de Naciones Unidas, anualmente se producen 400 millones de toneladas de plástico, y se estima que esta cifra se duplicará para el año 2040 [2]. Esta cifra crítica representa grandes riesgos, por cuanto una vez los plásticos llegan al medio ambiente, generan micro y nano plásticos.

El término microplásticos (MP) -empleado por primera vez en la literatura científica por Thompson et al-, hace referencia a pequeñas partículas y fibras de plástico [3]. Con el tiempo, las definiciones han variado, esto, en correspondencia con el tamaño que le han otorgado los diferentes autores a los MP. Según la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria, 2016), los microplásticos se definen como una mezcla heterogénea de materiales en diversas formas, tales como, fragmentos, fibras, esferoides, gránulos, pellets, astillas o perlas, con dimensiones que varían entre 0,1 μm y 5000 μm . Mientras que, los nano plásticos poseen tamaños que oscilan entre 0,001 μm y 0,1 μm [4].

Se ha determinado que la formación de los micro y nano plásticos (MNP) surge a partir de fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias corresponden a MNP creados deliberadamente para usos industriales y de consumo, por ejemplo, exfoliantes en limpiadores, cosméticos, partículas para la administración de fármacos en medicamentos, entre otros. Las fuentes secundarias constituyen a MNP derivados de procesos de desintegración, que ocurren tanto en medios terrestres como acuáticos [5].

Los MNP son contaminantes ambientales emergentes y persistentes, que se distribuyen en el ambiente con una amplia variedad de polímeros y tamaños, y son hallados en la tierra, la atmósfera, el agua, el aire, incluso, se ha detectado su presencia en el hielo y la nieve de varios ambientes montañosos, lo cual indica su alta capacidad de dispersión geográfica [6], [7], [8], [9]. Su reducido tamaño y persistencia facilita la entrada en el medio ambiente, y, de allí a los animales, principalmente en la fauna marina, que suele confundir los MNP con alimento. Razón por la que, estos animales consumen los MNP que ingresan a la cadena trófica [10]. De acuerdo a bioproyecciones, se estima que para el año 2100, entre $2,5 \times 10^7$ y $1,3 \times 10^8$ T de MP flotarán en el océano [11].

Si bien las cifras de micro y nano plásticos son más elevadas en los ecosistemas acuáticos que en los terrestres, se observa que una proporción significativa de estos contaminantes tiene su origen en los entornos terrestres. Se estima que más del 80% de los microplásticos se originan en tierra firme, mientras que, menos del 20% provienen directamente del océano [5], [12]. Esta discrepancia se debe a que los MNP terrestres, a menudo son arrastrados por medio de aguas subterráneas, inclusive, a través de la erosión natural. También pueden terminar en ríos y océanos [13].

La presencia de MNP en los ambientes marinos representa una preocupación creciente, por cuanto -como se ha afirmado-, estos pequeños fragmentos son ingeridos por la fauna marina, y, debido al consumo de animales de mar, pueden ingresar en la cadena alimentaria. Este problema no se limita únicamente a la vida marina, de hecho, un creciente cuerpo de evidencia sugiere que los MP también se están integrando en alimentos ampliamente consumidos, a través de animales terrestres que ingieren MP en el medio ambiente [14]. Según los datos del Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), el consumo inconsciente de MP por semana en cada

ser humano, puede ser de hasta 5 g. Con el tiempo, a su vez, se ha determinado que cada litro de agua tratada contiene cientos de MP. Por otra parte, se afirma que, existen más de 50 millones de MP por litro de agua embotellada [15], [16].

De acuerdo con lo anterior, la presencia de los MNP es alarmante no solamente para el medio ambiente, sino también para el cuerpo humano. Tal presencia se ha descubierto en heces, semen, placenta, esputo, leche materna, entre otras [17], [18], [19], [20]. Así, se subraya la identificación y detección MNP en diversos tejidos biológicos y fluidos corporales, lo cual, conmina la necesidad de investigar la interacción de los MNP con: los sistemas biológicos humanos, las vías de exposición, su internalización, acumulación, y, por ende, es preciso indagar acerca de los posibles efectos nocivos a nivel celular y sistémico.

Método

Para desarrollar la investigación se utilizó la metodología PICO, con el fin de facilitar la identificación de palabras claves que viabilizaran la búsqueda avanzada en diversas bases de datos, tales como: Web of Science, Nature, PubMed y Scopus. Se emplearon algunos conectores booleanos: AND, OR y NOT, para formular la ecuación de búsqueda. Se incluyeron términos como “microplastic”, “nanoplastic” y “Harmful effect”, entre otros, aplicando diferentes ecuaciones de búsqueda en función de las áreas de afectación, específicamente de las zonas gastrointestinal y respiratoria. Se procedió a aplicar filtros mediante la eliminación de los artículos duplicados, y a través de la revisión de los abstracts y títulos. Ulteriormente, con base en su contenido temático, se seleccionaron y analizaron los artículos académicos escogidos.

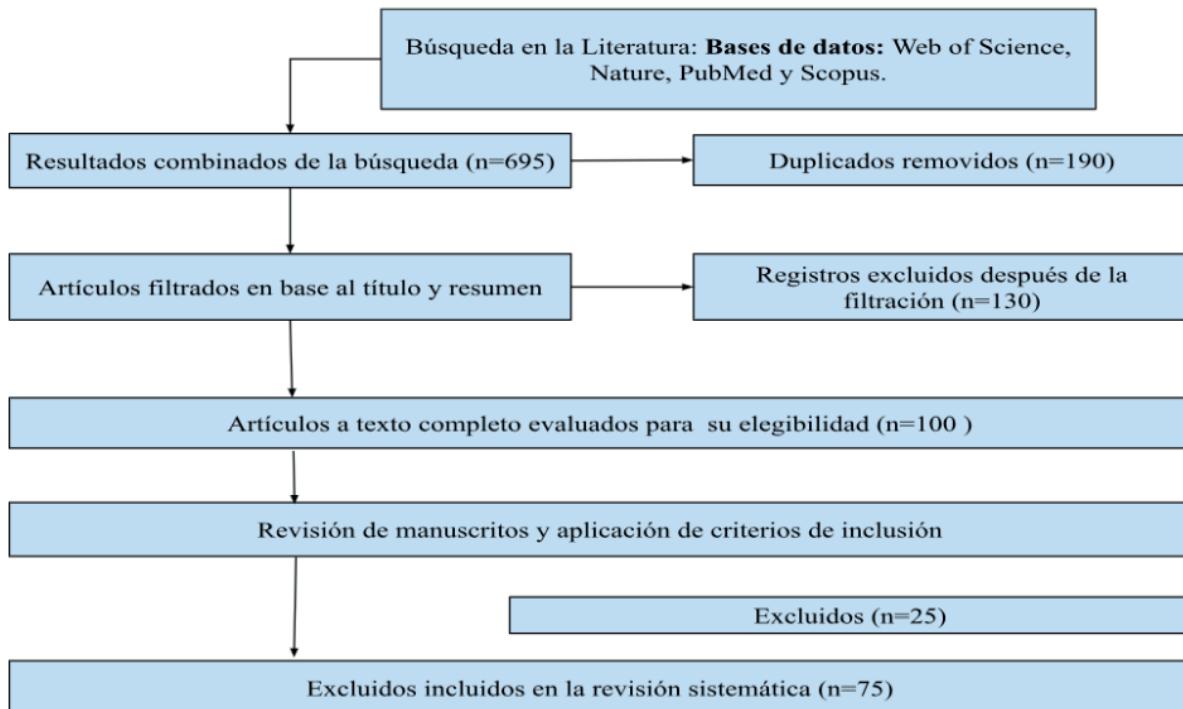


Figura 1. Flujograma de la búsqueda avanzada (Autor: Karol Sanchez y Daniela Santamaria) 2024.

Formación de Micro y Nano Plásticos

Los plásticos pueden descomponerse en microplásticos y nano plásticos, mediante distintos procesos que se dividen en biodegradables y no biodegradables. Entre las formas no biodegradables de degradación, se incluye la térmica, la cual, utiliza calor para fragmentar los plásticos, así como la degradación física, que se produce por la exposición a condiciones ambientales y provoca la reducción de estos materiales en fragmentos más pequeños. Los procesos naturales como la fotodegradación y la hidrólisis que dependen de la luz ultravioleta y el agua, respectivamente, actúan descomponiendo los enlaces químicos en los plásticos hasta llegar a formas monoméricas [21].

Los microorganismos juegan un papel fundamental en la degradación de los plásticos, ya que, rompen las estructuras poliméricas alterando sus propiedades mecánicas y aumentando su área superficial [22]. Ello facilita las reacciones químicas y las interacciones con otros microorganismos. Ciertas bacterias presentes en el medio ambiente también contribuyen a este proceso, mediante la producción de enzimas extracelulares que descomponen los enlaces en los plásticos. Se ha mencionado que, ciertas bacterias como *Nitratireductor* sp. y *Gordonia* sp. producen enzimas que facilitan la descomposición del polietileno de baja densidad (LDPE) y otros plásticos [23]. Como resultado, se producen partículas de menor tamaño, algunas de estas, pueden llegar a convertirse en nanoplásticos. Se estima que un gramo de microplástico puede dar origen a miles de millones de partículas.



Figura 2. Fuentes y destinos de los micro y nanoplásticos en el medio ambiente (Autor: Karol Sanchez y Daniela Santamaria) 2024.

Ahora bien, los microplásticos y nano plásticos surgen de dos tipos de fuentes: las primarias y secundarias. Las primarias incluyen productos industriales y de consumo: las secundarias son el resultado de la degradación de plásticos más grandes. Estos contaminantes se encuentran tanto en entornos acuáticos como terrestres, en los cuales se dispersan a grandes distancias, y, eventualmente ingresan a la cadena alimentaria, acumulándose en organismos marinos y potencialmente en el ser humano. Factores como la erosión, la fotodegradación y las corrientes oceánicas contribuyen a la dispersión de tales contaminantes, entretanto, los sistemas de

tratamiento de aguas residuales son ineficaces para retener estas partículas. Hecho que conduce a que los MNP se introduzcan en ríos, océanos y fuentes de agua dulce. Asimismo, los desechos plásticos en el suelo pueden ser arrastrados hacia cuerpos de agua, y, bajo la influencia de procesos hidrodinámicos se transportan a grandes distancias en las corrientes oceánicas, alcanzando una circulación profunda en los océanos [24].

En cuanto a la interacción de los MP con los organismos marinos, Liu y sus colaboradores, en el años 2022, evidenciaron una diferencia en la recepción de MP entre especies marinas. Esto es, que los peces no solo ingieren MP del agua y sedimentos mediante la respiración y filtración, sino también, al depredar organismos de niveles tróficos inferiores. Los estudios indican que los MP pueden acumularse y transferirse a lo largo de la cadena alimentaria, y factores como el calentamiento del agua, puede incrementar la ingestión de estas partículas en los peces [25], [26].

Vías de asimilación a MNP en el cuerpo humano

Los seres humanos entran en contacto con los MNP principalmente a través de la exposición oral, debido al consumo de agua y alimentos contaminados, así como, a través de la vía dérmica por el uso de jabones, exfoliantes o por contacto con el suelo. Así también, pueden ingresar por la precipitación de partículas en el aire, mediante la inhalación y el contacto dérmico [27]. Se han identificado otros mecanismos de afectación como la translocación de membranas, la absorción gastrointestinal, el estrés oxidativo, la disruptión endocrina y la neurotoxicidad, que representan riesgos adicionales para la salud humana.

Se ha estimado que entre 35.000 y 62.000 microplásticos (MP) ingresan anualmente al cuerpo humano a través de la respiración, lo que eventualmente puede acumularse en los pulmones. Por otro lado, entre 39.000 y 52.000 MP a través de la dieta y el consumo de agua potable, con destino principal al tracto digestivo. Cabe mencionar que estas cifras se basan en estimaciones realizadas sobre una dieta promedio estadounidense, por lo que, pueden variar significativamente según los hábitos alimenticios y la ubicación geográfica [28].

En esta revisión, se analiza las vías más relevantes: respiratoria, digestiva y dérmica, como se muestra en la figura 2.

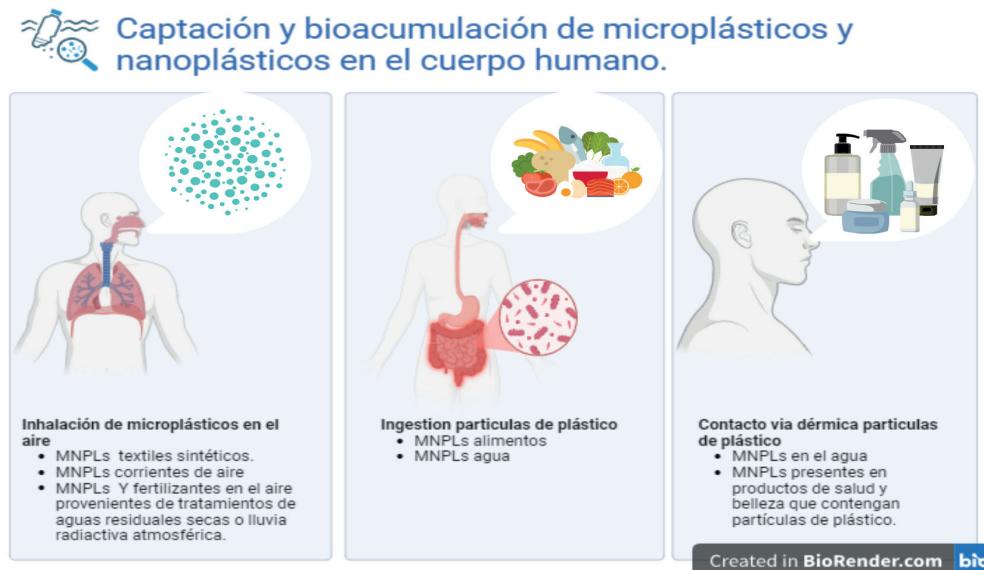


Figura 3. Vías de exposición principales de los MNP en humanos (Autor: Karol Sanchez y Daniela Santamaría) 2024.

Respiratoria

Una de las vías de entrada de los MNP que más se menciona es la respiratoria. En un estudio realizado en la ciudad de Londres (2020), se detectó una tasa de deposición atmosférica total (recolección de partículas que caen del aire y se acumulan en una superficie) de microplásticos fibrosos y no fibrosos combinados de 771 ± 167 partículas/m²/día; los resultados obtenidos plantea que existe una gran posibilidad de que los MNP, se depositen rápidamente en las vías respiratorias superiores [28]. En otros estudios, se constata -como lo señala Liu et al. (2019) en la investigación realizada en Shanghai-, que existe abundancia de microplásticos atmosféricos suspendidos (SAMP). Los resultados varian de 0 a 4.18 n/m³. Se concluye que la exposición a microplásticos en el aire es un problema relevante que puede impactar la salud respiratoria.

Es importante conocer no solo la exposición, sino también las cifras de inhalación. Se ha determinado la inhalación de ANP (nanoplásticos en el aire) con resultados de exposición diaria de inhalación en niños cuando están al aire libre, de 9,638.1 partículas/día (equivalente a 8.23×10^{-6} µg/día). Mientras que, los adultos inhalan 5,410.6 partículas/día (equivalente a 4.62×10^{-6} µg/día). En comparación, la exposición en ambientes cerrados es mucho mayor, con 5.30×10^5 partículas/día (equivalente a 5.79×10^{-4} µg/día) para los niños y 6.00×10^5 partículas/día (equivalente a 6.55×10^{-4} µg/día), que para los adultos. Estos valores muestran que la exposición en interiores es mayor, debido a la menor ventilación y la acumulación de partículas en el aire cerrado [29]. Estas cifras indican que la inhalación de MNP es una vía de exposición significativa, análisis que demanda mayor ampliación.

Amato-Lourenço et al (2021) en su artículo demuestra la presencia de microplásticos en tejidos pulmonares humanos obtenidos de autopsias. Expone que se hallaron partículas poliméricas (33 partículas) y fibras (4 partículas) en 13 de 20 muestras de tejido pulmonar. A su vez, se logró identificar que las fibras con un diámetro menor a 3 µm pueden alcanzar la región alveolar, debido a su reducido tamaño. Con el análisis de tales datos, se deduce que el avance de estas fibras a regiones alveolares pueda deberse a mecanismos como el impacto inercial (tendencia de las partículas a seguir su trayectoria de movimiento cuando el aire cambia de dirección), y la sedimentación (proceso por el cual las partículas más pequeñas, debido a su peso y tamaño. Es decir, estas fibras pueden depositarse en áreas más profundas como los alvéolos. Debido al material de la fibra, permanecen en el organismo durante períodos prolongados, lo cual podría aumentar el riesgo de efectos adversos en la salud. Precisamente, por cuanto las fibras poseen características de bio persistencia y resistencia [30].

Un análisis realizado por Dong et al. (2020) evaluó la toxicidad pulmonar *in vitro* en células epiteliales pulmonares humanas (BEAS-2B), en partículas de micro plásticos de poliestireno (PS-MP). Esta exposición provocó un aumento en la expresión de especies reactivas de oxígeno (ROS) y hemo oxigenasa-1 (HO-1) [31]. Las ROS, son moléculas capaces de inducir daño oxidativo a macromoléculas, tales como los ácidos nucleicos, lípidos y las proteínas. Es pertinente determinar y analizar este daño, puesto que, puede conducir a la muerte de células pulmonares, la pérdida de unidades alveolares y el desarrollo de enfermedades, como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (COPD) [32], [33].

Para evaluar la ROS, se utilizó DCFH-D (diacetato de 2',7'-dclorodihidrofluoresceína) en células BEAS-2B expuestas a PS-MP en diferentes concentraciones las cuales oscilaban entre 1-1000 µg/cm². El ensayo de la DCFH-DA es un compuesto no fluorescente que penetra fácilmente en las membranas celulares. Una vez se deposita dentro de la célula, es hidrolizado por esterasa que conforma la DCFH. Al ser oxidado por ROS, el DCFH se convierte en el compuesto fluorescente (DCF), lo que permite determinar los niveles de estrés oxidativo [34].

En este caso, los resultados fueron relevantes, por cuanto se observó una acumulación y elevación de las ROS en las BEAS-2B expuestas a las PS-MP de mayor concentración (1000 μ g/cm). El resultado sugiere que, las altas concentraciones de PS-MP ocasionan una producción excesiva de ROS, lo que conlleva a producir estrés oxidativo, provocando disfunción mitocondrial, ocasionando a su vez, el aumento de apoptosis. Este proceso de apoptosis exacerbada genera la pérdida de integridad del tejido pulmonar y a la progresiva pérdida de función pulmonar, observada en pacientes con Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC).

La evaluación de las ROS, son evaluadas en las distintas investigaciones con diferentes líneas celulares y tipo de micro o nano plásticos. Las ROS también fueron evaluadas frente la interacción de los Nano Plástico de Poliestireno (PSNPL) y la interacción con las células epiteliales nasales humanas primarias (HNEpC), los resultados obtenidos corroboran que, existe una significativa afección respiratoria, puesto que las especies reactivas de oxígeno intracelular (iROS) aumentaron del 20-30%. Al evaluar la producción de especies reactivas de oxígeno mitocondriales (mROS), se observó un aumento en su producción, tras el tratamiento con nanopartículas (NP) en las células BEAS-2B. Esto se debe a que los NP ocasionaron una disminución en la respiración mitocondrial y afectaron negativamente la función celular. Cabe mencionar que, la evaluación de las ROS generalmente se hace por el método de DCFH, con un período de tiempo de 24 horas [35], [36].

Las MNP también han demostrado inducir una respuesta inflamatoria significativa. La expresión de las citoquinas proinflamatorias IL-6 e IL-8 en las células BEAS-2B expuestas a PS-MP a 1,000 μ g/cm², siendo la IL-8 aumentada sólo en la concentración de 1,000 μ g/cm². Estos resultados corroboran el análisis anterior, puesto que la presencia PS-MP induce a estados de inflamación.

Los efectos de apoptosis e inflamación se confirmaron en el estudio realizado por Xu et al. (2019), en el cual se evaluaron los Nano Plásticos de poliestireno (PS-NP de 25 y 70 nm) en células epiteliales basales alveolares (A549), mediante el uso de reactivos FITC y Anexina V los cuales se utiliza para marcar células en las etapas tempranas de apoptosis y yoduro de propidio (PI) para indicar la necrosis. Para evaluar la fluorescencia específica de cada uno de los marcadores celulares se hizo uso de citometría de flujo.

Los resultados obtenidos evidencian que las PS-NP, especialmente las de menor tamaño, las cuales poseen un potencial citotóxico e inducen a un aumento de apoptosis celular. Se observó la internalización y adhesión de las PS-NP, y se determinó un aumento significativo de citoquinas proinflamatorias, como IL-6, IL-8, NF- κ B y TNF- α , esto indica que las nanopartículas inducen una respuesta inflamatoria en las células [37]. Un aumento significativo de citoquinas proinflamatoria, puede impactar profundamente a diversos procesos fisiológicos y patológicos en los seres humanos, debido a que estas citoquinas desempeñan roles cruciales en la mediación de la inflamación.

La exacerbación de las citoquinas proinflamatorias respiratorias, genera un impacto significativo en las patologías respiratorias, por cuanto, puede llegar a ocasionar daño pulmonar agudo, falla respiratoria, síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA), EPOC entre otras enfermedades [38]. En consecuencia, la inflamación iniciada en los pulmones debido a la exposición de las MNP, puede desencadenar una respuesta inflamatoria sistémica que afecta otros órganos y sistemas del cuerpo, en tanto la inflamación no es un proceso localizado. En este contexto, la exposición a MNPL induce una exacerbación de la respuesta inflamatoria, que produce al desarrollo y la progresión de diversas patologías sistémicas.

En particular, los niveles elevados de IL-6 y TNF se asocian con la progresión del cáncer colorrectal, la proliferación de células tumorales, la angiogénesis y la metástasis [37].

Del mismo modo, enfermedades inflamatorias crónicas como la artritis reumatoide y la osteoartritis presentan concentraciones elevadas de IL-6, alterando la homeostasis ósea y la función de los osteocitos [39], [40]. En el contexto del síndrome de respuesta inflamatoria sistémica (SIRS), citoquinas como IL-6 juegan un papel crítico en la disfunción multiorgánica, induciendo alteraciones en la función de órganos vitales y contribuyendo a la mortalidad asociada a sepsis [41].

Diversos estudios han constatado que la presencia de MNP ha ocasionado cambios notorios a nivel mitocondrial. Se ha evaluado la pérdida del potencial de membrana mitocondrial (MMP) en HNEpCs que estaban expuestas a NP de poliestireno con tamaños de 50 y 500 nm de (PS-50 y PS-500), para MMP se hizo uso de Kit MitoProbe™ TMRM, que contiene un tinte que se acumula dentro de las mitocondrias de las células en función de su potencial de membrana mitocondrial [35]. La pérdida del potencial de la membrana mitocondrial en las células nasales está principalmente asociada con la rinosinusitis crónica, con pólipos nasales (CRSwNP) [42].

En múltiples estudios se estima la internalización y acumulación. De hecho, se ha determinado que las PSNPL en HNEpC han logrado su internalización, mayoritariamente localizadas en el citoplasma, en especial, en partículas con menor tamaño. Así también, en las líneas celulares BEAS-2B y A549 la internalización es un proceso que generalmente ocurre debido a la penetración pasiva de la membrana y la endocitosis activa [35], [36], [43], [44].

Con respecto a la bioacumulación, se observó su absorción de PSNP en células A549, especialmente el de menor tamaño (70 nm). Se ha comprobado su acumulación en investigaciones, que indican que los MNP están presentes en los tejidos pulmonares con valores de $14,19 \pm 14,57$ partículas/g en los pulmones humanos, lo que resalta su potencial para acumularse [45], [46]. Como se subrayó anteriormente, su presencia en las diferentes líneas celulares a nivel respiratorio puede provocar estrés oxidativo e inflamación, que son mecanismos críticos de toxicidad que afectan la salud pulmonar [47].

Por último, se determinó que es viable que, las MNPL ocasionen un bloqueo de la vía de autofagia, debido a la acumulación de LC3-II y p62, siendo marcadores de autofagosomas. Mientras que, la p62 es una ubiquitina involucrada en la eliminación de desechos celulares, lo que sugiere, una posible acumulación de autofagosomas y una autofagia defectuosa [35].

Este bloqueo en la vía de autofagia o su inhibición, puede promover la inmunosupresión y facilitar el crecimiento tumoral [48].

Gastrointestinal

El tracto gastrointestinal constituye una de las principales rutas de exposición a los MNP en el organismo humano. Múltiples estudios han identificado que estas partículas están presentes tanto en el ambiente como en los alimentos. En una de las investigaciones desarrolladas en Pakistán, se detectó microplásticos en el tracto gastrointestinal de pollos de granja, específicamente en mollejas. De las 24 muestras analizadas, se hallaron 1.227 partículas de MP, con un promedio de 33,25 partículas por molleja. Los MP encontrados más comunes, eran fragmentos de polímeros como PVC (51,2%), LDPE (30,7%) y PS (13,6%). Tales hallazgos sugieren que los MP ingresan al sistema digestivo de los pollos mediante la ingesta de alimentos contaminados, lo cual representa un riesgo potencial para los humanos, precisamente, por cuanto estas partículas se acumulan en la cadena alimentaria [49]. Tras la ingestión de estos MP, las partículas pueden ingresar al tracto gastrointestinal mediante endocitosis por células M, y, translocarse en el tejido a través del transporte paracelular, que finalmente desencadena

una exposición sistémica [50], [51]. Este proceso no solo afecta la digestión y absorción de los nutrientes, sino que, también puede desencadenar una multiplicidad de afectaciones y daños físicos, químicos y biológicos en el tracto digestivo.

En estudios específicos realizados en modelos gastrointestinales simulados, se observó que todos los tipos de MP evaluados disminuían de manera notable la digestión de lípidos. Las partículas de PS destacaron por su mayor nivel de inhibición, efecto que, no depende del tamaño de las partículas, sino de su concentración. Aún luego de someterse a procesos de fotoenvejecimiento con luz solar artificial, las partículas de PS afectaron de forma adversa la digestión de lípidos [52].

Paralelamente, la ingestión de MNP también puede ocasionar daños físicos en el tracto digestivo, que derivan en inflamaciones y alteraciones de las funciones intestinales [53]. Estos efectos tóxicos están estrechamente relacionados a las propiedades físico-químicas de las partículas: tamaño, forma y modificaciones superficiales. Las partículas más pequeñas tienden a inducir los efectos más graves, debido a su mayor capacidad de penetración y a su interacción con las células del tracto digestivo [54].

En cuanto a la toxicidad celular, los MP y NP pueden suscitar efectos citotóxicos, que afectan la viabilidad celular y promueven la apoptosis en el sistema digestivo [55]. Este daño celular, exacerba los riesgos para la salud, en tanto, podría llevar a una disfunción en los tejidos y órganos afectados.

Ahora bien, por cuanto los MP absorben contaminantes persistentes como metales pesados y pesticidas, tras la ingestión de las partículas, pueden liberarse en el tracto gastrointestinal. Esto desencadena un aumento del estrés oxidativo y produce la alteración de la integridad de la barrera intestinal. El estrés oxidativo, es una consecuencia generada por el aumento de especies reactivas de oxígeno (ROS), que puede conducir a un desequilibrio en el sistema REDOX del organismo. Cuando el estrés oxidativo persiste, se produce un agotamiento de los antioxidantes y daño al ADN, lo que constituye la base de diversas patologías. Asimismo, el estrés oxidativo genera procesos de trastornos metabólicos y la activación de macrófagos [56].

Los MP, en particular los fabricados con poliestireno (PS), dan origen a un desequilibrio, al disminuir antioxidantes clave como el glutatión y la superóxido dismutasa, escenario que ocasiona inflamación crónica y daño celular [57]. Por otro lado, los aditivos plásticos como los ftalatos y el bisfenol A (BPA), que son disruptores endocrinos, interfieren con las funciones hormonales y agravan las respuestas inflamatorias en los tejidos expuestos.

Algunas pesquisas recientes, han identificado que el estrés oxidativo puede alterar significativamente la microbiota intestinal, generando disbiosis como consecuencia [58]. Este proceso, junto con los efectos directos de los MP/NP, desencadena una serie de impactos adversos para la salud [59]. El estrés oxidativo puede evaluarse no sólo mediante la medición directa de ROS, sino también, a través del análisis de sustancias antioxidantes, productos de peroxidación lipídica y subproductos oxidativos derivados del daño al ADN, los cuales se consideran biomarcadores clave [60].

De lo anterior se deriva que, se ha advirtido que las nanopartículas de poliestireno (PS-NP) de 44 nm y 100 nm se internalizan en células de adenocarcinoma gástrico, mediante endocitosis mediada por clatrina. Estas partículas, a concentraciones de 10 µg/L, indujeron incremento de IL-6 e IL-8 y provocaron alteraciones morfológicas. De manera similar, Inkielewicz-Stepniak et al. (2018) corroboraron que, la co-incubación de PS-NP cargadas positivamente con líneas celulares provocó una disminución dependiente de la concentración en la viabilidad celular,

observándose también mediante el uso de microscopía óptica, una distorsión morfológica de las células. Se sugirió que las altas concentraciones de PS-NP pueden inducir a la muerte celular, a través de mecanismos mediadores de caspasa-3, -7 y -9 [58].[21]

Como se ha descrito, las NP tienden a inducir efectos más graves, debido a su mayor capacidad de penetración y de interacción con las células del tracto digestivo [59], [60]. En este sentido, los NP poseen una capacidad notable para adsorber y transportar contaminantes persistentes como plomo, cadmio, mercurio y pesticidas orgánicos. Esta capacidad de unión actúa liberando en el sistema digestivo efectos nocivos. Así entonces, cuando los NP son ingeridos, generan efectos perjudiciales en las funciones celulares a nivel del epitelio intestinal, esto desemboca en la alteración de la integridad de la barrera intestinal, por lo tanto, conduce a riesgos en la salud digestiva [61].

Es pertinente mencionar que los MP, no solo tiene la capacidad de adsorción sino también de absorción, así mismo lo señala el estudio realizado por Hou et al, en este estudio se hizo uso de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y microplásticos de polietileno (PE) y polimetacrilato de metilo (PMMA). Los resultados obtenidos demostraron que los HAP con mayor peso molecular se adsorbían más fácilmente en los microplásticos, y la eficiencia de adsorción en PE fue entre 1,4 y 3,8 veces mayor que en PMMA. Posteriormente, se realizaron experimentos de desorción en un sistema simulado del tracto gastrointestinal humano, observándose que la actividad de las enzimas gastrointestinales afectaba directamente la desorción de los HAP. La eficiencia de desorción de los HAP del PMMA (0,7–41,6 %) fue significativamente mayor que la del PE (0,8–27,7 %), lo que indica una mayor liberación de contaminantes en el tracto gastrointestinal. Además, la simulación de dinámica molecular reveló que las enzimas en el líquido digestivo, atenuaba la interacción entre los microplásticos y los HAP, promoviendo la desorción de estos contaminantes. La evaluación de riesgos mostró que el riesgo cancerígeno asociado con la desorción de HAP del PMMA era mayor que el de PE, lo que resalta la importancia de entender los riesgos potenciales para la salud de la ingestión de microplásticos [62].

De igual manera, los MNP pueden contener disruptores endocrinos, interfiriendo con las funciones hormonales normales del cuerpo. Esto puede causar desequilibrios hormonales que afectan varios sistemas del cuerpo, incluidos los sistemas reproductivo y nervioso. Los ftalatos y el bisfenol A (BPA), aditivos comunes en plásticos, son ejemplos de disruptores endocrinos que se liberan a partir de microplásticos en el tracto gastrointestinal. Estos compuestos pueden interferir con el metabolismo, alterar las funciones hormonales y aumentar las respuestas inflamatorias en los tejidos expuestos, lo que compromete la homeostasis intestinal y la absorción de nutrientes, además de perjudicar la salud sistémica [57].

Al respecto, cabe resaltar que, es fundamental estudiar tales afectaciones -de las cuales no se ha investigado suficientemente-, con el fin de ahondar en el análisis de medidas que mitiguen los riesgos asociados a la exposición a micro y nano-plásticos.

Dérmica

La vía dérmica como una de las rutas de asimilación para el ingreso de MNP en el ser humano ha sido relevante, debido a su amplia presencia en formulaciones cosméticas y en el medio ambiente. Cada vez hay más investigaciones que indican que las MNP están presentes en los cosméticos, tanto como en las sustancias de los materiales de envasado. Se ha demostrado que los productos cosméticos y de cuidado personal (PCCP) pueden contener niveles de micropartículas de plástico y nanopartículas de hasta 50.391 partículas por gramo, y que cada uso contribuye a la introducción de 229.000 micropartículas de plástico en las aguas residuales cosméticas [63].

De acuerdo con una investigación realizada en Irán, se ha encontrado la presencia de MP en la piel. Los autores hallaron la presencia de microplásticos en las muestras de piel de la cara y de las manos, siendo superior a 4000 partículas de MP en cada una [64]. Se examinaron los efectos de los MP, usando partículas de poliestireno de diferentes tamaños (0,1, 0,5, 1 y 3 μm) en forma esférica, utilizando cultivos celulares derivados de fibroblastos dérmicos humanos (HDF) en forma esférica.

Los resultados obtenidos revelaron que la absorción de microplásticos de poliestireno (PS-MP) dentro de un entorno celular tridimensional (3D), puede resultar en diferentes patrones de penetración dependiendo de su tamaño. Los microplásticos más pequeños penetraron fácilmente en los HDFs, mientras que, los más grandes tendieron a adherirse a la superficie de los HDFs. Además, se observó que la penetración de los PS-MP causó una inhibición de la adhesión celular, lo cual sugiere efectos biológicos adversos [65].

Se ha comprobado que los MNP logran atravesar la barrera cutánea y potencialmente afectan la piel, generando inflamación y envejecimiento de las células cutáneas. El estudio aporta pruebas de que los MP de tamaño nanométrico inducen la fuga de ADN mitocondrial, trayendo como consecuencia una respuesta inflamatoria mediante el inflamasoma AIM2 [66]. Si bien, la vía dérmica de los MNP plantea posibles riesgos para la salud, es esencial tener en cuenta que el alcance total de sus efectos sobre la salud humana continúa siendo objeto de investigación [67].

Vectores

Por otra parte, se ha evidenciado que los MNP pueden actuar como vectores, tanto de toxinas, bacterias, virus como en metales pesados [68]. Este potencial de los microplásticos para actuar como vector de microorganismos de origen natural o antropogénico, es motivo de creciente preocupación. Entre estos riesgos, se ha identificado que ciertas bacterias adheridas a los microplásticos y nano plásticos, pueden portar genes de resistencia a antibióticos, suscitando la diseminación en ambientes acuáticos. Estudios recientes revelan que los microplásticos, y, en mayor medida los nano plásticos, pueden facilitar la diseminación de genes de resistencia a antibióticos. De acuerdo con el estudio realizado por Wang et al. (2022), se observó que los nano plásticos de poliestireno promueven la transferencia de genes de resistencia a antibióticos en *Escherichia coli*, mediante la transformación de plásmidos portadores del gen de resistencia a ampicilina, esto sugiere un riesgo en la propagación de resistencia en ambientes acuáticos complejos [69], [70]. Este fenómeno no solo incrementa la presencia de bacterias resistentes, también favorece la transferencia horizontal de genes. Ello puede dinamizar la propagación de infecciones multirresistentes, hecho que se constituye en un desafío creciente para la salud pública.

En consecuencia, es importante determinar más ampliamente cómo actúan los MPN como vectores. En la pesquisa realizado por Pestana (2021), se evaluaron los MP como portadores de las toxinas de cianobacterias, entre ellas, las microcistinas, las cuales son perjudiciales para la vida silvestre, y por ende, para los seres humanos [71]. En esta línea descriptiva, es indispensable remarcar que, las Cianobacterias están comúnmente presentes en cuerpos de agua, al igual que la prevalencia de MNP en ambientes acuáticos, este escenario indica que, existe una gran interacción entre ellas. En la investigación referida utilizaron toxinas de las cianobacterias, puesto que, durante las proliferaciones se pueden detectar altas concentraciones de metabolitos secundarios, como las microcistinas, las cuales son potencialmente tóxicas en el agua circundante.

Para evaluar las MP como vectores de toxinas, utilizaron diferentes tipos de MP, como: poliestireno [PS], cloruro de polivinilo [PVC], polietileno [PE] y tereftalato de polietileno [PET], en relación a dos congéneres de Microcistinas (MC): el MC-LR y MC-LF. Los resultados obtenidos demuestran que, en efecto existe adhesión de estas toxinas a los MP. Para evaluar, se utilizó espectrometría de masas con desorción/ionización, con matriz asistida por láser (MALDI), en aras de confirmar la presencia de microcistinas en la superficie de los microplásticos.

El poliestireno (PS) mostró el mayor potencial de adsorción para ambos congéneres de microcistinas, mientras que, el tereftalato de polietileno (PET) no reveló casi ninguna adsorción. Del MC-LF se evidencia una mayor tendencia a adsorberse en partículas de microplásticos en comparación con MC-LR. Estos resultados resaltan la capacidad de los microplásticos para actuar como vectores de microcistinas en el medio ambiente [71]. Una de las mayores preocupaciones es que puede llegar a pasar en la cadena alimentaria, a causa de la ingestión de microplásticos cargados de microcistinas por organismos acuáticos, lo que representa un riesgo para la salud de los organismos y potencialmente para los humanos.

El paso a la cadena alimentaria no solo puede ser por el consumo animales acuáticos, puesto que, ciertamente las microcistinas pueden acumularse en cultivos regados con agua contaminada, del mismo modo como puede suceder en el consumo de agua no tratada por ganado. Ello corrobora que la presencia en la cadena alimentaria es sumamente alta [72].

Así también, los microplásticos pueden adsorber metales pesados a través de procesos como la adsorción y la complejación, actuando como transportadores que aumentan la movilidad de estos elementos tóxicos en los ecosistemas acuáticos y terrestres[73], [74]. Una vez ingeridos por organismos acuáticos, los metales pesados pueden bioacumularse, lo cual conlleva mayor toxicidad en niveles tróficos superiores [75]. La presencia de metales pesados asociados con los microplásticos puede causar graves problemas de salud, entre otros, cáncer y trastornos neurológicos[76].

Asimismo, se ha demostrado que los micro y nano plásticos (MNP) pueden actuar como vectores de virus, aumentando su persistencia, transmisión e infectividad en diversos ecosistemas. Estos materiales tienen la capacidad de adsorber hasta el 98 % de los virus presentes en el agua. Su eficiencia depende del tamaño, la composición química y el grado de envejecimiento por exposición a factores como los rayos UV. Así, las interacciones electrostáticas facilitan la adhesión viral, suscitando que los virus sobrevivan más tiempo, incluso, a temperaturas elevadas. Tanto los microplásticos prístinos como los envejecidos, prolongan la infectividad de los virus adsorbidos. Estudios señalan que los MNP pueden propiciar la entrada de virus, como la influenza A, en células huésped, y por lo tanto, debilitar la respuesta inmune. Mientras que, otros sugieren que partículas plásticas en aguas residuales podrían actuar como plataformas para virus como el SARS-CoV-2, aumentando su estabilidad ambiental. Estas interacciones exponen implicaciones críticas para la salud humana y la seguridad ambiental, precisamente, dado el papel de los MNP en la diseminación de agentes virales en entornos acuáticos[77], [78].

Discusión

A partir del análisis de la literatura revisada, se identifica que los MNP constituyen un factor de riesgo emergente, con implicaciones para la salud humana, debido a su ubicuidad y capacidad de ingreso al organismo por diversas vías. Estas partículas no solo provocan efectos tóxicos e inflamatorios, sino que también pueden actuar como vectores. Por ello, resulta fundamental comprender las vías de exposición —respiratoria, gastrointestinal y dérmica—, aún existe una

gran vacío en las demás vías en las que puede ingresar y además la inherente necesidad de evaluar sus efectos a largo plazo. Entender estos efectos permite orientar estrategias para reducir su presencia y desarrollar medidas eficaces de control y prevención.

La evidencia actual señala que la inhalación de MNP es una vía crítica de exposición. Diversos estudios han identificado su presencia en tejidos pulmonares humanos, y han demostrado su potencial para inducir estrés oxidativo, inflamación y disfunción mitocondrial en células epiteliales respiratorias y posteriormente a la apoptosis, mecanismos claves que se relacionan con la EPOC. Sin embargo, existe una carencia de investigaciones que cuenten con un enfoque más amplio de líneas celulares que consideren tanto las vías respiratorias altas como bajas. Dicho enfoque podría proporcionar un panorama más completo y detallado. Esto ayudaría a entender cómo las nanopartículas ingresan, se acumulan y/o internalizan a lo largo del tracto respiratorio. Este análisis es esencial para comprender la biodistribución, toxicidad y el potencial de absorción de las MNP en las vías respiratorias.

En el análisis de mecanismos de daño celular, se destaca el uso del método DCFH para la detección de especies reactivas de oxígeno. Aunque es ampliamente utilizado, este método presenta limitaciones técnicas importantes, ya que, factores como el pH, el medio de cultivo y la presencia de suero pueden alterar significativamente la fluorescencia de DCF, afectando la interpretación de los resultados. Ello hace ostensible la necesidad de mejorar las herramientas metodológicas para obtener datos más confiables.

Asimismo, la ingestión de estas partículas representa una amenaza para la salud gastrointestinal, ya que, puede generar inflamación intestinal, disbiosis, estrés oxidativo y daño celular. Estudios *in vitro* e investigaciones en modelos simulados manifiestan alteraciones en la digestión de lípidos, citotoxicidad y apoptosis celular. Es necesario avanzar hacia investigaciones en modelos humanos que evalúen no solo la toxicidad directa, sino también, los efectos acumulativos de una exposición alimentaria continua.

Aunque la información sobre la vía dérmica es aún limitada, se ha identificado la presencia de MNP que ingresan a la piel, especialmente las de menor tamaño, desencadenando respuestas tales como: la internalización celular y activación del inflamasoma AIM2, debido a la liberación del ADN mitocondrial. De ahí que, resulta imperativo indagar: cómo la exposición dérmica a MNP podría estar asociada a inflamación cutánea crónica, envejecimiento prematuro y alteración de la función de la barrera epidérmica. Esto, teniendo en cuenta que, aún existen vacíos significativos en el análisis de tales efectos a largo plazo.

Finalmente, se ha documentado que los MNP pueden actuar como vectores de toxinas, bacterias multirresistentes, virus y metales pesados. Aunque existe información al respecto, es escasa la evidencia que hace patente cómo estas partículas transportan microorganismos y elementos perjudiciales para la salud.

Teniendo en cuenta los avances, es medular remarcar que la evidencia sobre los efectos de los MNP es aún limitada, y en su mayoría, está fundamentada en estudios *in vitro* o modelos simulados. La escasez de investigaciones *in vivo*, la falta de estandarización en los métodos analíticos, su baja sensibilidad y la corta duración de los estudios, dificultan una evaluación integral del riesgo. Sumado a ello, la variabilidad geográfica en la presencia de estas partículas comina estudios longitudinales y multicéntricos, que permitan entender su biodisponibilidad, toxicidad y los mecanismos de asimilación en condiciones reales de exposición.

En este contexto, es fundamental continuar desarrollando investigaciones que profundicen acerca de los efectos de la exposición crónica a MNP, singularmente, en su bioacumulación, toxicidad sistémica y posibles asociaciones con enfermedades humanas. Se concluye que, es relevante que este tipo de contaminantes emergentes sean incluidos dentro de los programas

de vigilancia ambiental y epidemiológica. Tal estudio compone un enfoque interdisciplinario y transdisciplinario, que, por lo tanto, articule y robustezca el diálogo esencial entre las ciencias de la salud, las ciencias sociales, esto, concatedadamente con la salud pública y las políticas públicas regulatorias.

Agradecimientos

Todas las figuras de este artículo de revisión fueron creadas con BioRender.com. y Canva (consultado el 10 de agosto de 2024) por los autores.

Referencias

- [1] U. W. Gedde, M. S. Hedenqvist, M. Hakkarainen, F. Nilsson, y O. Das, «Plastics and Sustainability», en *Applied Polymer Science*, U. W. Gedde, M. S. Hedenqvist, M. Hakkarainen, F. Nilsson, y O. Das, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 489-504. doi: 10.1007/978-3-030-68472-3_9.
- [2] «Un mazo de plástico reciclado para marcar el acuerdo sobre la contaminación por plásticos [Internet]. UNEP. 2022 [citado el 20 de febrero de 2024]. Disponible en: <http://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/un-mazo-de-plastico-reciclado-para-marcar-el-acuerdo-sobre-la>».
- [3] R. C. Thompson *et al.*, «Lost at Sea: Where Is All the Plastic?», *Science*, vol. 304, n.º 5672, pp. 838-838, may 2004, doi: 10.1126/science.1094559.
- [4] E. P. on C. in the F. Chain (CONTAM), «Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood», *EFSA J.*, vol. 14, n.º 6, p. e04501, 2016, doi: 10.2903/j.efsa.2016.4501.
- [5] S. Karbalaei, P. Hanachi, T. R. Walker, y M. Cole, «Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, n.º 36, pp. 36046-36063, dic. 2018, doi: 10.1007/s11356-018-3508-7.
- [6] «Microplastic Pollution in Soil | SDG Resources». Accedido: 8 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sdgresources.relx.com/articles/microplastics-soils-analytical-methods-pollution-characteristics-and-ecological-risks>
- [7] M. Wagner y S. Lambert, Eds., *Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants?*, vol. 58. en The Handbook of Environmental Chemistry, vol. 58. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-61615-5.
- [8] S. Allen *et al.*, «Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment», *Nat. Geosci.*, vol. 12, n.º 5, pp. 339-344, may 2019, doi: 10.1038/s41561-019-0335-5.
- [9] C. Campanale, C. Massarelli, I. Savino, V. Locaputo, y V. F. Uricchio, «A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health», *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, vol. 17, n.º 4, p. 1212, feb. 2020, doi: 10.3390/ijerph17041212.
- [10] M. E. McHale y K. L. Sheehan, «Bioaccumulation, transfer, and impacts of microplastics in aquatic food chains», *J. Environ. Expo. Assess.*, vol. 3, n.º 3, p. N/A-N/A, jul. 2024, doi: 10.20517/jeea.2023.49.
- [11] G. Everaert *et al.*, «Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions», *Environ. Pollut.*, vol. 242, pp. 1930-1938, nov. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.069.
- [12] M. A. Browne *et al.*, «Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, n.º 21, pp. 9175-9179, nov. 2011, doi: 10.1021/es201811s.
- [13] A. A. Horton, A. Walton, D. J. Spurgeon, E. Lahive, y C. Svendsen, «Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities», *Sci. Total Environ.*, vol. 586, pp. 127-141, may 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.190.
- [14] D. Santillo, K. Miller, y P. Johnston, «Microplastics as contaminants in commercially important seafood species», *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 13, n.º 3, pp. 516-521, may 2017, doi: 10.1002/ieam.1909.
- [15] P. Schwabl *et al.*, «Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series», *Ann. Intern. Med.*, vol. 171, n.º 7, pp. 453-457, oct. 2019, doi: 10.7326/M19-0618.
- [16] B. Jiang *et al.*, «Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review», *Environ. Health Prev. Med.*, vol. 25, n.º 1, p. 29, jul. 2020, doi: 10.1186/s12199-020-00870-9.
- [17] A. Ragusa *et al.*, «Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta», *Environ. Int.*, vol. 146, p. 106274, ene. 2021, doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.

- [18] Q. Zhao *et al.*, «Detection and characterization of microplastics in the human testis and semen», *Sci. Total Environ.*, vol. 877, p. 162713, jun. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162713.
- [19] S. Huang *et al.*, «Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, n.º 4, pp. 2476-2486, feb. 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c03859.
- [20] A. Ragusa *et al.*, «Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk», *Polymers*, vol. 14, n.º 13, Art. n.º 13, ene. 2022, doi: 10.3390/polym14132700.
- [21] A. P. Abad López, J. Trilleras, V. A. Arana, L. S. García-Alzate, y C. D. Grande-Tovar, «Atmospheric microplastics: exposure, toxicity, and detrimental health effects», *RSC Adv.*, vol. 13, n.º 11, pp. 7468-7489, mar. 2023, doi: 10.1039/d2ra07098g.
- [22] J. Yuan, J. Ma, Y. Sun, T. Zhou, Y. Zhao, y F. Yu, «Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics», *Sci. Total Environ.*, vol. 715, p. 136968, may 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136968.
- [23] Z. Rong, X.-W. Xu, y Y.-H. Wu, «Biodegradation of low-density polyethylene film by two bacteria isolated from plastic debris in coastal beach», *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 278, p. 116445, jun. 2024, doi: 10.1016/j.ecotox.2024.116445.
- [24] C. Wayman y H. Niemann, «The fate of plastic in the ocean environment – a minireview», *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 23, n.º 2, pp. 198-212, mar. 2021, doi: 10.1039/D0EM00446D.
- [25] Z. Pan, Q. Liu, J. Xu, W. Li, y H. Lin, «Microplastic contamination in seafood from Dongshan Bay in southeastern China and its health risk implication for human consumption», *Environ. Pollut.*, vol. 303, p. 119163, jun. 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119163.
- [26] M. Saha *et al.*, «Microplastics in seafood as an emerging threat to marine environment: A case study in Goa, west coast of India», *Chemosphere*, vol. 270, p. 129359, may 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129359.
- [27] C. E. Enyoh, A. W. Verla, E. N. Verla, F. C. Ibe, y C. E. Amaobi, «Airborne microplastics: a review study on method for analysis, occurrence, movement and risks», *Environ. Monit. Assess.*, vol. 191, n.º 11, p. 668, nov. 2019, doi: 10.1007/s10661-019-7842-0.
- [28] S. L. Wright, J. Ulke, A. Font, K. L. A. Chan, y F. J. Kelly, «Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport», *Environ. Int.*, vol. 136, p. 105411, mar. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2019.105411.
- [29] Y. Chen, Y. Meng, G. Liu, X. Huang, y G. Chai, «Probabilistic Estimation of Airborne Micro- and Nanoplastic Intake in Humans», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, n.º 21, pp. 9071-9081, may 2024, doi: 10.1021/acs.est.3c09189.
- [30] L. F. Amato-Lourenço, R. Carvalho-Oliveira, G. R. Júnior, L. dos Santos Galvão, R. A. Ando, y T. Mauad, «Presence of airborne microplastics in human lung tissue», *J. Hazard. Mater.*, vol. 416, p. 126124, ago. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126124.
- [31] C.-D. Dong, C.-W. Chen, Y.-C. Chen, H.-H. Chen, J.-S. Lee, y C.-H. Lin, «Polystyrene microplastic particles: In vitro pulmonary toxicity assessment», *J. Hazard. Mater.*, vol. 385, p. 121575, mar. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121575.
- [32] J. Zhu *et al.*, «Reactive Oxygen Species-Dependent Calpain Activation Contributes to Airway and Pulmonary Vascular Remodeling in Chronic Obstructive Pulmonary Disease», *Antioxid. Redox Signal.*, vol. 31, n.º 12, pp. 804-818, oct. 2019, doi: 10.1089/ars.2018.7648.
- [33] P. Kovacic y R. Somanathan, «Pulmonary toxicity and environmental contamination: radicals, electron transfer, and protection by antioxidants», *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 201, pp. 41-69, 2009, doi: 10.1007/978-1-4419-0032-6_2.
- [34] L. R. de Haan *et al.*, «Experimental Conditions That Influence the Utility of 2'7'-Dichlorodihydrofluorescein Diacetate (DCFH2-DA) as a Fluorogenic Biosensor for Mitochondrial Redox Status», *Antioxidants*, vol. 11, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 2022, doi: 10.3390/antiox11081424.
- [35] B. Annangi, A. Villacorta, M. López-Mesas, V. Fuentes-Cebrian, R. Marcos, y A. Hernández, «Hazard Assessment of Polystyrene Nanoplastics in Primary Human Nasal Epithelial Cells, Focusing on the Autophagic Effects», *Biomolecules*, vol. 13, n.º 2, Art. n.º 2, feb. 2023, doi: 10.3390/biom13020220.
- [36] S. Lin *et al.*, «Metabolomics Reveal Nanoplastic-Induced Mitochondrial Damage in Human Liver and Lung Cells», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, n.º 17, pp. 12483-12493, sep. 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c03980.
- [37] D. N. Florescu *et al.*, «Correlation of the Pro-Inflammatory Cytokines IL-1 β , IL-6, and TNF- α , Inflammatory Markers, and Tumor Markers with the Diagnosis and Prognosis of Colorectal Cancer», *Life Basel Switz.*, vol. 13, n.º 12, p. 2261, nov. 2023, doi: 10.3390/life13122261.

- [38] «The role of interleukin-6 and janus kinases in the pathogenesis, and treatment of SARS-CoV-2», *J. Lung Pulm. Respir. Res.*, vol. Volume 9, n.º Issue 1, mar. 2022, doi: 10.15406/jlpr.2022.09.00273.
- [39] M. Zhou, S. Li, y J. L. Pathak, «Pro-inflammatory Cytokines and Osteocytes», *Curr. Osteoporos. Rep.*, vol. 17, n.º 3, pp. 97-104, jun. 2019, doi: 10.1007/s11914-019-00507-z.
- [40] A. M. Shanshal, R. H. Aljorani, y S. A. Hussain, «Targeting IL-6 Signaling Pathways for Musculoskeletal Disorders Treatment: Risks and Benefits», *Al-Rafidain J. Med. Sci. ISSN 2789-3219*, vol. 4, pp. 34-43, mar. 2023, doi: 10.54133/ajms.v4i.101.
- [41] G. L. Cabrera-Rivera *et al.*, «Increased TNF- α production in response to IL-6 in patients with systemic inflammation without infection», *Clin. Exp. Immunol.*, vol. 209, n.º 2, pp. 225-235, jun. 2022, doi: 10.1093/cei/uxac055.
- [42] Y. H. Yoon *et al.*, «Altered Mitochondrial Functions and Morphologies in Epithelial Cells Are Associated With Pathogenesis of Chronic Rhinosinusitis With Nasal Polyps», *Allergy Asthma Immunol. Res.*, vol. 12, n.º 4, pp. 653-668, abr. 2020, doi: 10.4168/aaair.2020.12.4.653.
- [43] M. Xu *et al.*, «Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell», *Sci. Total Environ.*, vol. 694, p. 133794, dic. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133794.
- [44] L. Liu, K. Xu, B. Zhang, Y. Ye, Q. Zhang, y W. Jiang, «Cellular internalization and release of polystyrene microplastics and nanoplastics», *Sci. Total Environ.*, vol. 779, p. 146523, jul. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146523.
- [45] Y.-X. Zhang, M. Wang, L. Yang, K. Pan, y A.-J. Miao, «Bioaccumulation of differently-sized polystyrene nanoplastics by human lung and intestine cells», *J. Hazard. Mater.*, vol. 439, p. 129585, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129585.
- [46] L. Zhu *et al.*, «Tissue accumulation of microplastics and potential health risks in human», *Sci. Total Environ.*, vol. 915, p. 170004, mar. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170004.
- [47] G. D. Albano, R. P. Gagliardo, A. M. Montalbano, y M. Profita, «Overview of the Mechanisms of Oxidative Stress: Impact in Inflammation of the Airway Diseases», *Antioxidants*, vol. 11, n.º 11, p. 2237, nov. 2022, doi: 10.3390/antiox11112237.
- [48] T.-F. Tsai *et al.*, «Autophagy blockade potentiates cancer-associated immunosuppression through programmed death ligand-1 upregulation in bladder cancer», *J. Cell. Physiol.*, vol. 237, n.º 9, pp. 3587-3597, sep. 2022, doi: 10.1002/jcp.30817.
- [49] «First Report on Microplastics Quantification in Poultry Chicken and Potential Human Health Risks in Pakistan». Accedido: 27 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2305-6304/11/7/612>
- [50] *The impact of microplastics on the gut microbiome and health*. FAO, 2023. doi: 10.4060/cc5294en.
- [51] K. D. Cox, G. A. Coverton, H. L. Davies, J. F. Dower, F. Juanes, y S. E. Dudas, «Human Consumption of Microplastics», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, n.º 12, pp. 7068-7074, jun. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b01517.
- [52] H. Tan, T. Yue, Y. Xu, J. Zhao, y B. Xing, «Microplastics Reduce Lipid Digestion in Simulated Human Gastrointestinal System», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, n.º 19, pp. 12285-12294, oct. 2020, doi: 10.1021/acs.est.0c02608.
- [53] D. M. Reddy Prasad, B. S. Naveen Prasad, R. Senthilkumar, K. Saravana Kumar, y S. Manickkam, «Interactive behavior of cadmium ions onto polyethylene microplastics in aquatic system», *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 21, n.º 12, pp. 7915-7922, ago. 2024, doi: 10.1007/s13762-024-05508-9.
- [54] M. B. Paul *et al.*, «Micro- and nanoplastics – current state of knowledge with the focus on oral uptake and toxicity», *Nanoscale Adv.*, vol. 2, n.º 10, pp. 4350-4367, 2020, doi: 10.1039/D0NA00539H.
- [55] I. Inkleiewicz-Stepniak *et al.*, «The Role of Mucin in the Toxicological Impact of Polystyrene Nanoparticles», *Materials*, vol. 11, n.º 5, Art. n.º 5, may 2018, doi: 10.3390/ma11050724.
- [56] M. Sharifi-Rad *et al.*, «Lifestyle, Oxidative Stress, and Antioxidants: Back and Forth in the Pathophysiology of Chronic Diseases», *Front. Physiol.*, vol. 11, jul. 2020, doi: 10.3389/fphys.2020.00694.
- [57] R. Ding, Y. Ma, T. Li, M. Sun, Z. Sun, y J. Duan, «The detrimental effects of micro-and nano-plastics on digestive system: An overview of oxidative stress-related adverse outcome pathway», *Sci. Total Environ.*, vol. 878, p. 163144, jun. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163144.
- [58] H. Zhang *et al.*, «Influence of Functional Group Modification on the Toxicity of Nanoplastics», *Front. Mar. Sci.*, vol. 8, ene. 2022, doi: 10.3389/fmars.2021.800782.
- [59] L. M. Thornton Hampton *et al.*, «Characterizing microplastic hazards: which concentration metrics and particle characteristics are most informative for understanding toxicity in aquatic organisms?», *Microplastics Nanoplastics*, vol. 2, n.º 1, p. 20, ago. 2022, doi: 10.1186/s43591-022-00040-4.

- [60] K. Bucci y C. M. Rochman, «Microplastics: a multidimensional contaminant requires a multidimensional framework for assessing risk», *Microplastics Nanoplastics*, vol. 2, n.º 1, p. 7, feb. 2022, doi: 10.1186/s43591-022-00028-0.
- [61] T. Gouin, «Addressing the importance of microplastic particles as vectors for long-range transport of chemical contaminants: perspective in relation to prioritizing research and regulatory actions», *Microplastics Nanoplastics*, vol. 1, n.º 1, p. 14, ago. 2021, doi: 10.1186/s43591-021-00016-w.
- [62] G. Hou *et al.*, «The adsorption of PAHs on microplastics and desorption in the simulated human digestive system», *Chem. Eng. J.*, vol. 473, p. 145157, oct. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.145157.
- [63] C. Guerranti, T. Martellini, G. Perra, C. Scopetani, y A. Cincinelli, «Microplastics in cosmetics: Environmental issues and needs for global bans», *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 68, pp. 75-79, may 2019, doi: 10.1016/j.etap.2019.03.007.
- [64] S. Abbasi y A. Turner, «Human exposure to microplastics: A study in Iran», *J. Hazard. Mater.*, vol. 403, p. 123799, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123799.
- [65] S. Eom, W. Shim, y I. Choi, «Microplastic-induced inhibition of cell adhesion and toxicity evaluation using human dermal fibroblast-derived spheroids», *J. Hazard. Mater.*, vol. 465, p. 133359, mar. 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.133359.
- [66] W. Han, J. Cui, G. Sun, X. Miao, Z. Pufang, y L. Nannan, «Nano-sized microplastics exposure induces skin cell senescence via triggering the mitochondrial localization of GSDMD», *Environ. Pollut. Barking Essex 1987*, vol. 349, p. 123874, may 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.123874.
- [67] J. Domenech y R. Marcos, «Pathways of human exposure to microplastics, and estimation of the total burden», *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 39, pp. 144-151, jun. 2021, doi: 10.1016/j.cofs.2021.01.004.
- [68] G. Chen *et al.*, «Speciation and release risk of heavy metals bonded on simulated naturally-aged microplastics prepared from artificially broken macroplastics», *Environ. Pollut. Barking Essex 1987*, vol. 295, p. 118695, feb. 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118695.
- [69] X. Wang *et al.*, «A neglected risk of nanoplastics as revealed by the promoted transformation of plasmid-borne ampicillin resistance gene by Escherichia coli», *Environ. Microbiol.*, vol. 24, n.º 10, pp. 4946-4959, 2022, doi: 10.1111/1462-2920.16178.
- [70] I. Silva, E. T. Rodrigues, M. Tacão, y I. Henriques, «Microplastics accumulate priority antibiotic-resistant pathogens: Evidence from the riverine plastisphere», *Environ. Pollut. Barking Essex 1987*, vol. 332, p. 121995, sep. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121995.
- [71] C. J. Pestana *et al.*, «Potentially Poisonous Plastic Particles: Microplastics as a Vector for Cyanobacterial Toxins Microcystin-LR and Microcystin-LF», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, n.º 23, pp. 15940-15949, dic. 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c05796.
- [72] E. M. Redouane *et al.*, «Health risk assessment of lake water contaminated with microcystins for fruit crop irrigation and farm animal drinking», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n.º 33, pp. 80234-80244, jun. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-27914-1.
- [73] B. Liu *et al.*, «Interaction of microplastics with heavy metals in soil: Mechanisms, influencing factors and biological effects», *Sci. Total Environ.*, vol. 918, p. 170281, mar. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.170281.
- [74] S. Vaijayanthimala y K. Sharma, «Microplastics as Vectors for Metals from Mines and Fuels: Environmental Pathways and Implications», *J. Mines Met. Fuels*, pp. 370-375, 2023, doi: 10.18311/jmmf/2023/43592.
- [75] K. Patidar, B. Ambade, F. Mohammad, y A. A. Soleiman, «Microplastics as heavy metal vectors in the freshwater environment: Distribution, variations, sources and health risk», *Phys. Chem. Earth*, vol. 131, p. 103448, oct. 2023, doi: 10.1016/j.pce.2023.103448.
- [76] A. R. Kul, N. Başak, S. Ergin, y V. Benek, «Physical Chemical Properties of Some Heavy Metals (Arsenic, Lead and Copper) and Their Effects on Health», en *Current Researches in Health Sciences-IV*, C. Çetin y İ. Meydan, Eds., Özgür Yayınları, 2023. doi: 10.58830/ozgur.pub387.c1601.
- [77] M. Shen *et al.*, «Micro(nano)plastics: Unignorable vectors for organisms», *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 139, pp. 328-331, feb. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.01.004.
- [78] J. Lu, Z. Yu, L. Ngiam, y J. Guo, «Microplastics as potential carriers of viruses could prolong virus survival and infectivity», *Water Res.*, vol. 225, p. 119115, oct. 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.119115.

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.

Gestión ambiental en la subcuenca del río Rincón para preservar la calidad del agua superficial en La Península de Osa

Environmental Management in the Rincón River Sub-Basin to Preserve Surface Water Quality in the Osa Peninsula

Guillermo Calvo-Brenes¹, Laura Robleto-Villalobos²

Fecha de recepción: 28 de noviembre, 2024
Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2025

Calvo-Brenes, G; Robleto-Villalobos, L. Gestión ambiental en la subcuenca del río Rincón para preservar la calidad del agua superficial en La Península de Osa. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 121-131.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7601>



- 1 Centro de Investigación Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
 calvogmo@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0002-7021-3509>
- 2 Chestnut Hill Farms LLC, Estados Unidos de America.
 consultoraecobalance@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0001-3447-8059>

Palabras clave

Manejo ambiental; índice de calidad del agua; uso de suelo; modelo predictivo.

Resumen

Un estudio preliminar evaluó la calidad del agua en la subcuenca del río Rincón mediante un modelo predictivo basado en variables socioambientales y el Índice de Calidad del Agua (ICA) Calvo-TEC. Se analizaron escenarios futuros para determinar el impacto de diferentes actividades sobre la calidad del agua, combinando análisis de cobertura del suelo, modelado predictivo y evaluación participativa. El estudio identificó que actividades como el aumento de pastos o charrales tienen un impacto mínimo, mientras que la expansión de cultivos permanentes o temporales y la pérdida de bosque generan efectos negativos significativos. Los resultados destacan que la conservación e incremento del área boscosa, así como prácticas de manejo responsable, son esenciales para preservar este recurso, especialmente en la Reserva Forestal Golfo Dulce. Entre los cultivos predominantes, la Palma Africana requiere especial atención debido a su alto impacto en la región. Además, se propone el desarrollo de actividades económicas sostenibles como los sistemas agroforestales, la reducción del uso de agroquímicos y la diversificación de ingresos. Estas estrategias permiten equilibrar la protección de la calidad del agua con el bienestar socioeconómico de los habitantes. Con base en estos hallazgos, se establecieron criterios de manejo ambiental enfocados en la conservación hídrica de la subcuenca. Estas medidas son replicables en otras áreas de la Península de Osa, consolidando su utilidad como un modelo de gestión sostenible a nivel regional.

Keywords

Environmental management; water quality index; land use; sub-basins; water quality prediction model.

Abstract

A preliminary study assessed water quality in the Rincón River sub-basin using a predictive model based on socio-environmental variables and the Water Quality Index (ICA) Calvo-TEC. Future scenarios were analyzed to determine the impact of various activities on water quality, combining land cover analysis, predictive modeling, and participatory evaluation. The study identified that activities such as the increase in pastures or shrublands have minimal impact, whereas the expansion of permanent or temporary crops and deforestation generate significant negative effects. The results highlight that forest conservation and expansion, as well as responsible management practices, are essential for preserving this resource, particularly in the Golfo Dulce Forest Reserve. Among the predominant crops, African Palm requires special attention due to its high impact in the region. Additionally, sustainable economic activities such as agroforestry systems, reducing agrochemical use, and diversifying income sources are proposed. These strategies allow for balancing water quality protection with the socioeconomic well-being of local inhabitants. Based on these findings, environmental management criteria were established to prioritize water conservation in the sub-basin. These measures are replicable in other areas of the Osa Peninsula, consolidating their utility as a sustainable management model at the regional level.

Introducción

El agua es esencial para la vida, tanto para consumo humano como para la agricultura, la ganadería, los procesos industriales y el mantenimiento de los ecosistemas. Sin embargo, diversas actividades humanas, como el vertido de aguas residuales domésticas, los desechos industriales y las prácticas agrícolas, generan efectos negativos en el medio ambiente [1]. La deforestación, producto de la expansión agrícola y urbana, destruye hábitats naturales y afecta la biodiversidad acuática [2], [3].

El monitoreo frecuente de la calidad del agua es crucial, ya que los ríos contaminados impactan también los océanos y las comunidades pesqueras de la Península de Osa. Se estima que el 80% de las enfermedades en el mundo están relacionadas con el agua [4]. Los ríos reciben contaminantes no solo por vertidos directos, sino también indirectos por escorrentías durante lluvias, especialmente en zonas con procesos erosivos [5]. Además, el aumento de la población y las actividades agrícolas y ganaderas afectan la calidad del agua.

Para evaluar esta calidad, se utilizan indicadores que se agrupan en un Índice de Calidad del Agua (ICA), como el ICA Calvo-TEC, que ha demostrado ser eficaz en la región centroamericana [5], [6]. El entorno socioambiental también influye en la calidad del agua, lo que permite predecir su estado mediante modelos predictivos adecuados [7]. El estudio de la calidad del agua es más efectivo cuando se enfoca en unidades geográficas como cuencas o microcuencas, que integran factores del ciclo hidrológico y el uso del suelo [8].

La Península de Osa, conocida por su biodiversidad, es un sitio crucial para la conservación ecológica y el ecoturismo sostenible, contribuyendo a la investigación científica y a la salud de los ecosistemas marinos [9]. Desde los años 90, el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) ha adquirido terrenos dentro de la Reserva Forestal Golfo Dulce (RFGD) en la Península para incrementar la cobertura boscosa, lo que ha demostrado beneficios para la calidad del agua de los ríos, como se evidenció en estudios previos dentro de la subcuenca del río Rincón [10].

La subcuenca del río Rincón está predominantemente cubierta por bosques (78.2%), con una pequeña fracción de tierras dedicadas a la agricultura. Aunque la actividad agrícola es baja (1.1%), se proyecta que podría aumentar significativamente en el futuro, lo que representa una amenaza para la región, especialmente por su proximidad a manglares y la costa del Golfo Dulce.

La sostenibilidad del sistema dependerá de una adecuada gestión, tanto del recurso hídrico como de la cuenca, promoviendo una agricultura sostenible [12]. En su momento, se evaluó el impacto de cambios en el uso del suelo mediante un modelo predictivo de calidad del agua en la Subcuenca por medio de modelos predictivos de calidad del agua en función de las variables socioambientales de la zona [10]. En este artículo se evaluó el uso actual del suelo y se valoraron algunos sistemas de gestión de recursos que favorezca un desarrollo sostenible para la población local.

Este trabajo representa un avance con respecto a investigaciones anteriores realizadas por el mismo autor en la subcuenca del río Rincón, al incorporar un modelo predictivo que permite proyectar escenarios futuros de cambio en el uso del suelo y su impacto sobre la calidad del agua. A diferencia de estudios previos centrados en el diagnóstico del estado actual mediante el Índice de Calidad ICA Calvo-TEC, en esta ocasión se combinan herramientas de análisis espacial, modelado y evaluación participativa, lo que permite establecer relaciones más dinámicas entre las actividades humanas y la conservación del recurso hídrico. Esta integración amplía la utilidad del modelo como instrumento para la toma de decisiones en la planificación territorial.

Además, el estudio propone criterios de manejo ambiental concretos y replicables, orientados a promover prácticas sostenibles que equilibren la conservación hídrica con el bienestar socioeconómico de la población local. Se destacan estrategias como el fomento de sistemas agroforestales, la reducción del uso de agroquímicos y la diversificación de ingresos, con atención especial a cultivos de alto impacto como la Palma Africana. Estas propuestas permiten escalar los hallazgos más allá del ámbito local, consolidando un modelo de gestión ambiental aplicable a otras zonas de la Península de Osa.

Materiales Y Métodos

Localización del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la subcuenca del río Rincón, en la Península de Osa, que incluye parte del Parque Nacional Corcovado, de la Reserva Forestal Golfo Dulce (RFGD) y una zona costera, relacionada con propiedades privadas. Aunque gran parte de la subcuenca está cubierta por bosque, también se identifican actividades ganaderas y agrícolas, como lo es mayoritariamente el cultivo de palma africana y en menor escala, la siembra de arroz. También se identifica una zona de baja densidad poblacional (Figura 1).

En la RFGD, el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) continúa su política de adquisición de terrenos, destinados a aumentar la cobertura boscosa de la reserva. Estos terrenos son utilizados por particulares para pastizales o plantaciones forestales bajo el programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) del Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO).

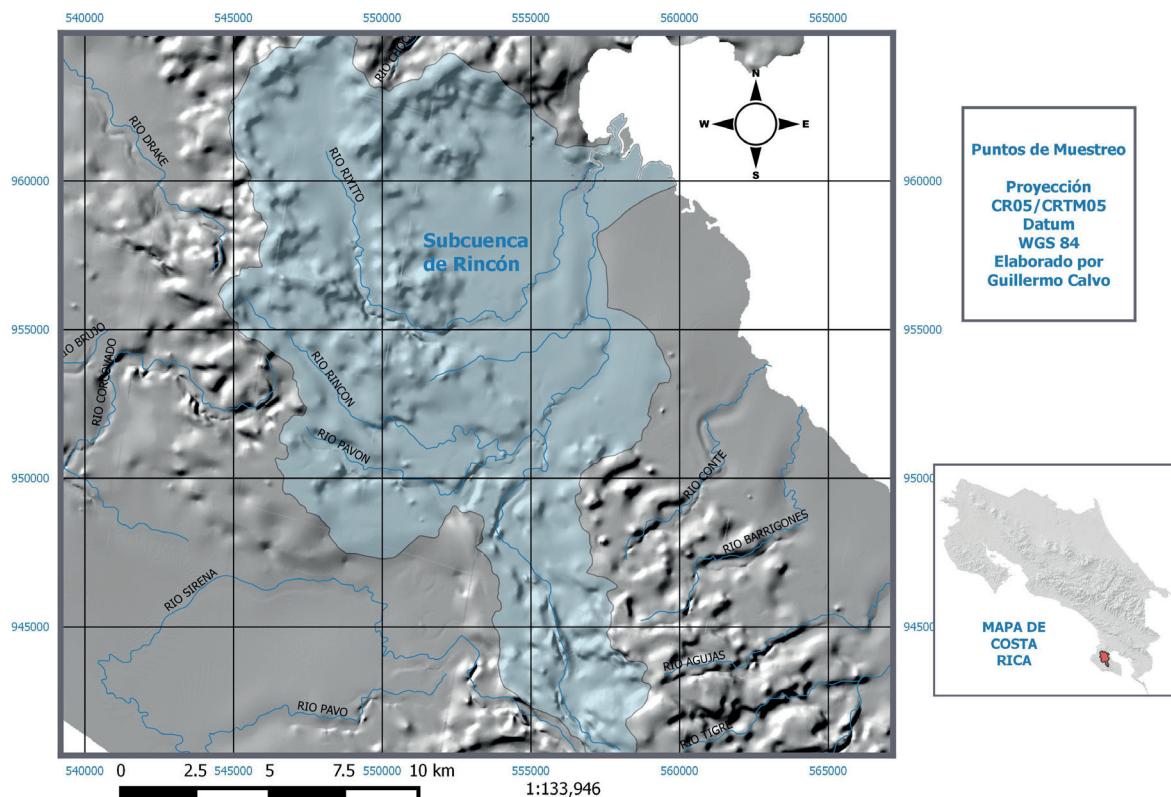


Figura 1. Localización de la subcuenca del río Rincón en la Península de Osa. Fuente: [10]

Recolección de la Información

Parte de la información fue obtenida a través de veintiséis entrevistas semiestructuradas a personas involucradas en actividades en la subcuenca, enfocadas en los procesos relevantes para el proyecto de investigación. También se realizaron visitas de campo con observación y participación directa, organizando talleres y otras actividades para recolectar información. Además, se evaluaron actividades productivas fuera de la subcuenca que favorecen usos de suelo positivos para la calidad del agua en la RFGD, las cuales podrían replicarse en la subcuenca.

Las actividades productivas seleccionadas, tras un análisis comparativo, incluyen: sistemas agroforestales y agrosilvopastoriles, educación ambiental participativa, monocultivos permanentes y estacionales (como el arroz) y el manejo forestal.

Resultados Y Discusión

La Figura 2 muestra los distintos usos del suelo en la subcuenca del río Rincón. La mayor parte de la subcuenca está cubierta por bosques, especialmente en las zonas altas, donde se encuentra el Parque Nacional Corcovado y la RFGD. La zona costera, que no pertenece a la RFGD, es de propiedad privada y se destina a actividades agrícolas y ganaderas. Algunos de estos terrenos colindan con manglares y la costa del Golfo Dulce, lo que representa un riesgo de contaminación por fertilizantes, pesticidas y otros contaminantes.

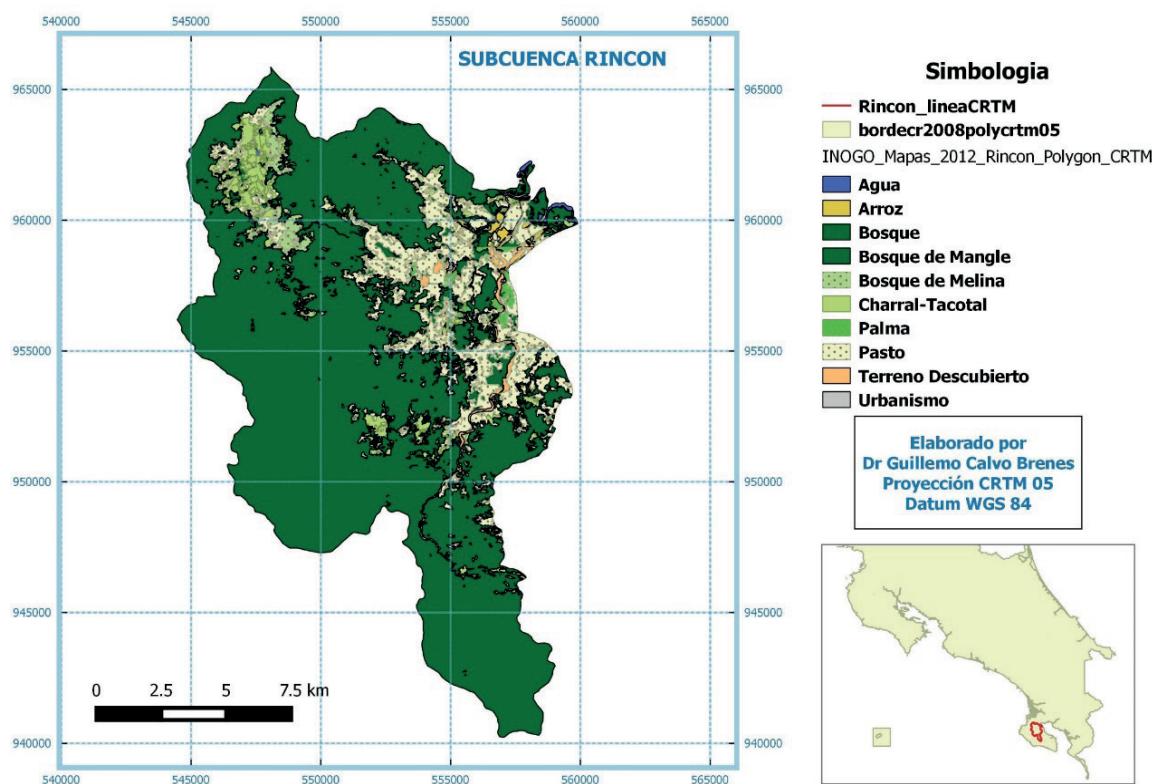


Figura 2: Distribución de la cobertura-uso del suelo en la Subcuenca del río Rincón. Fuente: [10]

Las Figuras 2 y 3 resumen la distribución del uso del suelo en la subcuenca, expresada en porcentaje de área cubierta por cada tipo de uso. El 78% del área está cubierta por bosque, equivalente a 16,706 hectáreas. El 14% (2,901 hectáreas) está destinado a pastos ganaderos. Los cultivos representan aproximadamente el 1.1%, con 131 hectáreas dedicadas a palma aceitera, 105 hectáreas a arroz, y 326 hectáreas clasificados como terreno descubierto, posiblemente para cultivos estacionales. Además, 1,187 hectáreas corresponden a charrales-tacotales (6%), y 3 hectáreas están destinadas a uso urbanístico, representando menos del 0.02%.

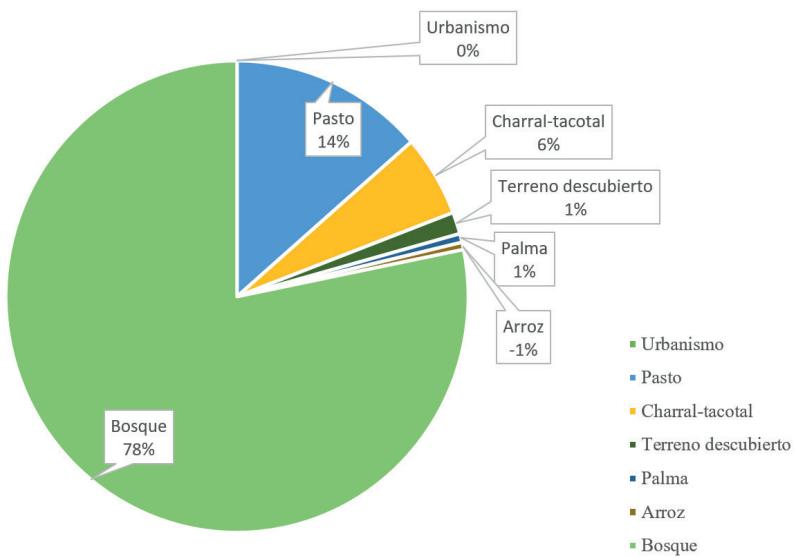


Figura 3. Porcentaje de uso del suelo en la subcuenca del río Rincón.

En la subcuenca del río Rincón se distinguen tres franjas: la parte alta, correspondiente al Parque Nacional Corcovado; la franja media, que pertenece a la Reserva Forestal Golfo Dulce (RFGD); y la franja costera (Cuadro 1). La Figura 3 muestra la distribución del área por franja, donde la RFGD ocupa el 57.7% y la franja costera el 18.6%. Esta última es especialmente relevante debido a los diversos usos del suelo, incluidos los agrícolas.

Cuadro 1 Distribución porcentual de las distintas franjas dentro de la subcuenca del río Rincón.

Zona	Área (km ²)	Relación (%)
Subcuenca Rincón	214,0	100,0
Franja de Parque Nacional	50,8	23,7
Franja de RFGD	123,4	57,7
Franja Costera	39,8	18,6

La Península de Osa es uno de los grandes tesoros naturales de Costa Rica y del mundo. Sin embargo, cuenta con bajos índices de desarrollo. El motivo principal para realizar este análisis es la preocupación que genera el problema del desempleo y precarización laboral que, según el Instituto de Desarrollo Rural (IDER), manifiestan los habitantes de la Reserva Forestal Golfo Dulce.

La RFGD es un área protegida habitada, es decir, que sus casi 60.000 hectáreas, corresponden a un territorio que es compartido por bosques, vida silvestre y comunidades con aproximadamente 4.000 habitantes [13], [14]. De ahí que sea tan importante promover la buena convivencia y el beneficio mutuo, entre la vida silvestre y los habitantes de la reserva; además de integrar a los habitantes en el proceso de conservación de la calidad de los cuerpos de agua.

En el país, la conversión de pastizales y tierras agrícolas a plantaciones de palma africana (*Elaeis guineensis*) ha venido creciendo. El 66.52% de estas plantaciones se encuentran en el Pacífico Sur con un crecimiento del 17% entre 2006 y 2011 [14]. Sin embargo, la plaga “flecha seca” ha afectado gravemente las plantaciones, especialmente en Osa y Golfito, con una pérdida del 50% de las plantaciones. Se especula que la plaga “flecha seca” es el resultado de malas prácticas agrícolas, relacionadas con el abuso de agroquímicos, lo que favorece el ataque de microorganismos e insectos a las plantaciones [13].

La expansión de las plantaciones de palma plantea amenazas, como la deforestación, la pérdida de biodiversidad, la sedimentación, la erosión del suelo, la contaminación del agua y la pérdida de hábitat. Además, sustituyó las prácticas agrícolas tradicionales de la región [15]. El interés de los agricultores por la palma aceitera ha crecido debido a su rentabilidad, el apoyo externo para costos iniciales y el bajo mantenimiento [16]. Las condiciones climáticas son favorables para el cultivo de palma; el área cuenta con la precipitación anual y suficiente radiación solar, más el hecho de que los agricultores están reutilizando terrenos agrícolas degradados [17].

Según los hallazgos de esta investigación, en la Península de Osa un grupo significativo de agricultores se ha organizado en cooperativas. Una de estas cooperativas está formada por 105 productores que gestionan fincas de entre 7.5 y 10 hectáreas, con un promedio de 143 palmas por hectárea. La palma representa para las familias agricultoras un proyecto que les permite satisfacer sus necesidades básicas y generar ganancias. Cada finca generalmente representa un núcleo familiar de al menos 4 personas adultas, sin contar a los niños.

Estas cooperativas han venido innovando modelos diferentes de buenas prácticas agrícolas en comparación con los modelos tradicionales de cultivo de la palma. El cuadro 2 presenta un análisis comparativo entre ambos modelos, de acuerdo con lo indicado por una de estas cooperativas.

Cuadro 2. Análisis Comparativo del modelo tradicional con respecto a modelos innovadores aplicados al cultivo de palma africana.

Aspecto	Modelo Tradicional	Modelo Innovador
Control de malezas	Uso intensivo de agroquímicos y técnicas que degradan el suelo y afectan los ecosistemas.	Reducción del uso de agroquímicos: dos limpiezas manuales y un agroquímico durante los primeros años; a partir del cuarto año, limpieza manual anual con guadaña.
Uso de fertilizantes	Alta dependencia de fertilizantes químicos con costo elevado y no sostenible.	Incorporación de abonos orgánicos y microorganismos, tal como compostaje y suero de leche vacuna; uso de carbón como mejorador del suelo; enfoque en la sostenibilidad.
Diversificación de cultivos	Monocultivo intensivo con riesgo para la seguridad alimentaria por disminución de cultivos de autoconsumo.	Diversificación con cultivos como cacao, tubérculos, plátano y maíz, que promueven seguridad alimentaria y estabilidad económica para las familias.

Aspecto	Modelo Tradicional	Modelo Innovador
Impacto ambiental	Limpieza excesiva de entrecalles y rodajas, lo que elimina vegetación y genera vulnerabilidad frente a plagas, con aumento de procesos erosivos.	Siembra de frijol terciopelo como cobertura para fijar nitrógeno, reducir malezas y mantener la fertilidad del suelo. Creación de áreas de amortiguamiento con cultivos.
Manejo de plagas y enfermedades	No logra controlar enfermedades como la flecha seca o el anillo rojo; generando pérdidas en productividad.	Implementación de áreas de amortiguamiento con cultivos arbóreos; mejora de la resiliencia del sistema agrícola mediante prácticas regenerativas.
Protección de recursos naturales	No prioriza la conservación de agua ni la estabilización de suelos.	Siembra de bambú guadua cerca de cursos de agua y en pendientes para estabilizar suelos; creación de barreras protectoras y corredores ecológicos.
Rentabilidad	Alta inversión inicial en insumos químicos y fertilizantes; rentabilidad dependiente exclusivamente del monocultivo.	Reducción de costos por uso de fertilizantes orgánicos y mano de obra manual; ingresos diversificados por productos como cacao, bambú y cultivos de autoconsumo.

Estas cooperativas están investigando técnicas que permitan a los pequeños productores asegurar su sustento y la sostenibilidad de sus fincas. Para ello, organizan talleres prácticos donde comparten estas técnicas y demuestran cómo pueden ayudar a los productores a ahorrar dinero. La reducción en el uso de herbicidas en las plantaciones de palma ha permitido la proliferación de una gran diversidad de plantas nativas que no compiten con el cultivo. Estas plantas tienen un alto potencial ornamental, por lo que se propone extraerlas y establecer un vivero para abastecer la industria hotelera local. No obstante, los permisos necesarios para la extracción aún están pendientes.

Además, al producir abono como insumo para las plantaciones de palma, se ha identificado la posibilidad de comercializar los excedentes, en caso de que se generen. Asimismo, se ha detectado la necesidad de producir carbón vegetal para aplicar al suelo y estabilizar los abonos. Por este motivo, se está investigando cómo carbonizar y peletizar los desechos vegetales resultantes del proceso de extracción de aceite.

Finalmente, mediante la creación de barreras vivas con bambú y cacao, la cooperativa ha logrado diversificar su oferta comercial al obtener dos productos adicionales.

La extracción de madera del bosque en la región no ha ofrecido una alternativa sostenible para los propietarios, debido a la desigual distribución de los ingresos en la cadena de producción. Los finqueros reciben apenas entre el 8 % y el 10 % del precio final, mientras que los dueños de maquinaria obtienen alrededor del 12 % al 14 %, los aserraderos entre el 20 % y el 33 %, y las empresas comercializadoras concentran el 50 % de las ganancias.

Actualmente, la administración de la RFGD colabora con la sociedad civil en la elaboración del Plan de Manejo de la reserva, al tiempo que desarrolla el proyecto de investigación denominado *Manejo Forestal y Certificación del Origen Legal de la Madera en la Reserva Forestal Golfo Dulce (MAFOR-COL)*. Este proyecto incluye actividades de educación y sensibilización dirigidas a los habitantes de la reserva y las comunidades vecinas.

Según la administración de la RFGD, el manejo forestal es una estrategia que contribuye tanto a la conservación de los bosques como al mejoramiento de los medios de vida de las familias propietarias. La propuesta de manejo forestal en desarrollo fomenta el comercio justo de la madera y promueve el consumo ético y responsable. Además, este enfoque debilita la tala ilegal y el comercio clandestino de madera [13].

Según el IDER, las decisiones sobre el desarrollo en la zona suelen estar influenciadas por el contexto económico regional, lo que genera una tendencia a implementar actividades promovidas por proyectos nacionales o macroregionales. Ejemplos de esto son los cultivos de palma y arroz en la actualidad, y el palmito y melón en el pasado. Sin embargo, esta dinámica no ha generado un aumento significativo en la calidad de vida de los pobladores, al menos no en la medida esperada.

Como solución, se propone fomentar proyectos basados en las capacidades y recursos locales, que promuevan la participación de la población y fortalezcan la comunicación e integración entre los actores sociales y las diversas comunidades. Este enfoque busca abordar de manera efectiva las problemáticas sociales de la región. Es fundamental reconocer que la comunidad está compuesta por múltiples voces y perspectivas, por lo que alcanzar consensos es clave para maximizar los beneficios y lograr resultados positivos [13].

Es necesario dar prioridad al ordenamiento territorial y a la resolución del conflicto de tenencia de la tierra, así como medir la mejora efectiva en la calidad de vida de los habitantes de la zona. Además de los indicadores biológicos, deben incluirse indicadores de desarrollo humano. Esto permitirá que el plan de manejo de la RFGD no solo sea un instrumento de conservación que atraiga recursos económicos, sino también una herramienta para promover una mejor calidad de vida, al ordenar y regularizar la economía ecológica de la reserva.

Conclusiones

El principal uso del suelo en la subcuenca del río Rincón es el bosque, lo cual contribuye significativamente a la conservación de la calidad del agua, la cual preserva la biodiversidad y las actividades artesanales en ríos, el Golfo Dulce y la zona marina, así como los numerosos manglares de la península. Aunque el uso agrícola es limitado, existe un potencial de expansión en la franja costera de la subcuenca. Sin embargo, este desarrollo podría comprometer la calidad del agua si no se gestiona adecuadamente.

El aumento de áreas dedicadas a pastos o charral tacotal no parece tener un impacto negativo sobre la calidad del agua. Esto sugiere que la producción agrícola mediante sistemas agroforestales, que funcionan de manera similar a los tacotales, es una estrategia favorable para preservar la calidad del agua. En contraste, el incremento en las áreas de siembras permanentes sí afecta negativamente la calidad del agua, por lo que esta actividad debe ser monitoreada cuidadosamente. Tal es el caso de la siembra de la Palma Africana en la zona.

El criterio principal para decidir sobre la adquisición de terrenos dentro de la Reserva Forestal Golfo Dulce (RFGD) debe enfocarse en preservar la cobertura boscosa [18]. En los casos donde no sea viable adquirir nuevos terrenos, se deben implementar estrategias para mantener y proteger la cobertura boscosa existente.

De acuerdo con los resultados de este estudio, las actividades productivas con mayor viabilidad en la zona son el turismo de bajo impacto y la producción agrícola bajo sistemas agroforestales. Sin embargo, algunas actividades económicamente viables, como el cultivo de palma y el aprovechamiento forestal, no siempre contribuyen a la preservación de la calidad del agua. Estas actividades pueden llevarse a cabo únicamente si se aplican medidas estrictas de mitigación de impactos.

El análisis realizado evidencia que la implementación de buenas prácticas agrícolas tiene un impacto positivo en múltiples aspectos clave. Estas prácticas fomentan un modelo más sostenible al reducir el uso de agroquímicos, diversificar los cultivos y mejorar la calidad del

suelo mediante técnicas orgánicas. Además, aumentan la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a plagas y enfermedades a través de estrategias como áreas de amortiguamiento y cobertura vegetal.

Asimismo, estas prácticas favorecen la conservación de los recursos naturales, especialmente del suelo y el agua, ayudando a mitigar los efectos negativos asociados al monocultivo intensivo. También fortalecen la seguridad alimentaria al garantizar el acceso a alimentos básicos y mejorar la estabilidad económica de las familias, disminuyendo su dependencia exclusiva de cultivos como la palma. Estos hallazgos resaltan la importancia de promover la adopción de buenas prácticas agrícolas como un pilar esencial para lograr sistemas agrícolas sostenibles y equitativos en la región.

Referencias

- [1] G. Calvo-Brenes, *Ríos: Fundamentos sobre su calidad y su relación con el entorno socioambiental*, First. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2015.
- [2] C. Carrasco, C. Rayme, R. D. P. Alarcón, Y. Ayala, J. Arana, and H. Aponte, "Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú," *RBT*, vol. 68, no. S2, pp. S116–S161, Oct. 2020, doi: 10.15517/rbt.v68iS2.44344.
- [3] V. G. Duschek, M. Springer, G. H. Niedrist, and L. Füreder, "Macroinvertebrates as indicators in tropical streams with different land use in southern Costa Rica," *Acta Zoobot Austria*, vol. 156, pp. 99–113, 2019.
- [4] G. Calvo-Brenes, "Nuevo índice para valorar la calidad de aguas superficiales en Costa Rica," *TM*, Oct. 2019, doi: 10.18845/tm.v32i4.4796.
- [5] N. Gil-Rodas, G. Calvo-Brenes, A. Guerra, and A. Perdomo, "Water quality assessment of six rivers of the Pacific side of Guatemala," *Environ Earth Sci*, vol. 80, no. 5, p. 196, Mar. 2021, doi: 10.1007/s12665-021-09505-w.
- [6] G. Calvo-Brenes, *Indices e indicadores sobre la calidad del agua*, First. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica, 2018.
- [7] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, *Introduction to linear regression analysis*, Sixth edition. in Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2021.
- [8] A. M. Braz, P. H. M. Garcia, A. L. Pinto, E. S. Chávez, and I. J. D. Oliveira, "Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra," *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 29, no. 1, pp. 69–85, Jan. 2020, doi: 10.15446/rcdg.v29n1.76232.
- [9] E. Vargas-Campos, E. Arnold, and D. Garcia-Godinez, "La experiencia de Caminos de Osa: una iniciativa de turismo sostenible en Costa Rica," *Rev. Ambientales.*, vol. 52, no. 2, p. 16, Jul. 2018, doi: 10.15359/rca.52-2.14.
- [10] G. Calvo-Brenes, J. Mora-Molina, A. Chavarría-Vidal, and A. Orozco-Barrantes, "Desarrollo de un programa piloto de gestión ambiental en microcuencas para mejorar la calidad de los ríos en la Reserva Forestal Golfo Dulce, Península de Osa, Costa Rica Development of an environmental management novel program in watersheds to improve water quality in rivers in the Reserva Forestal Golfo Dulce in Península of Osa, Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 29, no. 3, pp. 15–29, 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2285.
- [11] G. Calvo-Brenes, N. Quirós-Bustos, D. Robles-Chaves, and A. Caballero-Chavarría, "Contenido de metales pesados en sedimentos de varios ríos de Costa Rica," *TM*, Oct. 2024, doi: 10.18845/tm.v37i4.6940.
- [12] N. Gil-Rodas *et al.*, "A comparative study of several types of indices for river quality assessment," *Water Quality Research Journal*, vol. 58, no. 3, pp. 169–183, Aug. 2023, doi: 10.2166/wqrj.2023.029.
- [13] IDER, "PLAN DE DESARROLLO RURAL TERRITORIAL 2024-2030: CONSEJO TERRITORIAL DE DESARROLLO RURAL PENINSULA DE OSA." 2024. [Online]. Available: <https://www.inder.go.cr/peninsula-de-osa/PDRT-Peninsula-de-Osa.pdf>
- [14] K. G. H. Zuñiga, "Informe : monitoreo del estado de la Palma Aceitera en las principales regiones productoras," Abril 2022, [Online]. Available: https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/8292/Vargas_Y_Informe_monitoreo_estado_palma_aceitera_CR_2018_2022_2ed.pdf
- [15] A. Ávila Romero and J. Albuquerque, "Impactos socioambientales del cultivo de la palma africana: los casos mexicano y brasileño," *Econom. y Socied.*, vol. 23, no. 53, p. 1, Jun. 2018, doi: 10.15359/ey.s.23-53.4.

- [16] M. Mosquera Montoya, E. Ruiz Álvarez, D. E. Munévar Martínez, M. C. Estupiñán Villamil, Á. Guerrero, and S. Cala, "Estudio de costos de producción 2021 para empresas benchmark del sector de la palma de aceite de Colombia," *Palmas*, vol. 43, no. 4, pp. 26–39, Dec. 2022, doi: 10.56866/01212923.13911.
- [17] I. Garita, "African Palm and Environmental Sustainability," *Sol de Osa*, 2016.
- [18] G. Calvo-Brenes, J. Mora-Molina, A. Chavarría-Vidal, and A. Orozco-Barrantes, "Desarrollo de un programa piloto de gestión ambiental en microcuencas para mejorar la calidad de los ríos en la Reserva Forestal Golfo Dulce, Península de Osa, Costa Rica," *TM*, vol. 29, no. 3, p. 15, Nov. 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2885.

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.

Aplicación de la metodología Lean seis sigma para la recuperación del PVC en la empresa Conducen SRL alineado al modelo de economía circular

Application of the Lean six sigma methodology for the recovery of PVC in the Conducen SRL company aligned with the circular economy model

Juan Manuel Arias-Araya¹, Jorge Francisco Rovira-Guzmán², Hector Jesus Ramirez-Mora³, Esteban Alberto Cárdenas-Solorzano⁴

Fecha de recepción: 5 de diciembre, 2024

Fecha de aprobación: 11 de marzo, 2025

Arias-Araya, J.M; Rovira-Guzmán, J.F; Ramirez-Mora, H.J; Cárdenas-Solorzano, E.A. Aplicación de la metodología Lean seis sigma para la recuperación del PVC en la empresa Conducen SRL alineado al modelo de economía circular. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 132-156.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7566>

1 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 juan.manuel.arias@uhispano.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0009-8221-4275>

2 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 jorge.rovira0253@uhispano.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-7706-8251>

3 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 hector.ramirezm@uhispano.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-7720-148X>

4 Universidad Hispanoamericana. San José, Costa Rica.

 esteban.cardenas@uhispano.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-7017-4190>



Palabras clave

Lean seis sigma; economía circular; recuperación de PVC; eficiencia operativa; reducción CO₂; gestión de residuos.

Resumen

El estudio presenta la implementación de la metodología Lean Seis Sigma para la recuperación del PVC (Policloruro de Vinilo) generado en el proceso de purgas en la empresa Conducen SRL alineándolo a los principios de la economía circular. Mediante la aplicación estructurada del ciclo DMAIC [1] y herramientas como Ishikawa, “5 porqués”, matriz AMEF y análisis visual, se logró identificar las principales causas del desperdicio y desarrollar un plan de recuperación técnica y organizativa. Como resultado, se alcanzó una recuperación del 92% del material, reduciendo en 23.7% los costos asociados, y evitando la emisión estimada de 4 toneladas métricas de CO₂ anuales. La propuesta demostró ser sostenible, replicable y alineada con prácticas de producción más limpia. El proyecto destaca como ejemplo de mejora continua aplicable en contextos industriales que busquen eficiencia operativa con responsabilidad ambiental.

Keywords

Lean six sigma; circular economy; PVC recovery; operational efficiency; CO2 reduction; waste management.

Abstract

This study describes the implementation of the Lean Six Sigma methodology to recover purged PVC waste in the company Conducen SRL, aligning the production process with circular economy principles. By applying the DMAIC cycle and tools such as the Ishikawa diagram, “5 Whys”, FMEA, and visual analysis, the main root causes of waste were identified, leading to the development of a structured recovery strategy. As a result, the company achieved a 92% recovery rate, reduced production costs by 23.7%, and avoided an estimated 4 metric tons of annual CO₂ emissions. The solution proved to be sustainable, replicable, and aligned with cleaner production practices. This project serves as a strong example of continuous improvement in industrial settings seeking operational efficiency and environmental responsibility.

Introducción

La creciente demanda del mercado de tubos de PVC en la región latinoamericana combinado con la sostenibilidad han llevado a las empresas a buscar formas innovadoras de reducir el desperdicio y aumentar la eficiencia de sus procesos mediante una lógica de circularidad de sus residuos [2] [3] [4] [5] [6] en sus modelos productivos [7] [8] [9] [10] [11]. Además aprovechan la oportunidad de la apertura de nuevos mercados a nivel local asociados [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]. En este contexto, la empresa Conducen SRL, dedicada a la fabricación de conductores eléctricos enfrenta el desafío de minimizar el material desperdiciado PVC; específicamente en el proceso de extrusión mientras se realiza el cambio del producto (setup). Este reto adquiere mayor relevancia si se considera que el PVC es un material utilizado para fabricar una variedad de productos de plástico, entre los que se incluyen cañerías, revestimientos de alambres y cables y materiales para empaque [19], agregados livianos [20], lonas plásticas [21], tarjetas bancarias [22], cubiertas protectoras para pisos inferiores de automóviles, materiales laminados y en fabricación de fibra [23], entre otros relacionados en los sectores de construcción, transporte, atención sanitaria, deportes y ocio [24].

El presente estudio busca lograr el objetivo mencionado en el párrafo anterior. El cual se justifica no solo por la necesidad de optimizar los recursos sino también por la de promover prácticas más sostenibles dentro de la industria, dado que el PVC tarda en degradarse por su resistencia y durabilidad [5] [25]. Es importante destacar que para lograr la finalidad planteada, esta investigación busca implementar metodologías Lean [26] [27], las cuales han probado a través del tiempo sus múltiples beneficios en procesos tanto de manufactura como de servicios centradas en la eliminación de desperdicios y la mejora continua [28].

Las preguntas clave que guían esta investigación son: ¿Cuál es la magnitud del desperdicio de PVC en el proceso de purgas en Conducen SRL? ¿Qué causas subyacen a este desperdicio? ¿Cómo pueden las herramientas Lean ayudar a mitigar estas causas? Y finalmente, ¿qué impacto tienen las mejoras implementadas en la eficiencia operativa y ambiental de la empresa?

Materiales y métodos

Para abordar las preguntas planteadas en la sección anterior, el estudio utilizó un enfoque mixto que combina métodos cualitativos y cuantitativos. Este enfoque permitió que los resultados obtenidos fueran más precisos y su análisis fuera planteado desde diferentes perspectivas. Con respecto al tipo de investigación abordado, fue descriptivo y aplicativo. Además de incluir un diseño observacional y longitudinal, logrando con ello brindar no solo un seguimiento continuo de los cambios y mejoras implementadas en el tiempo, sino que también permitió verificar y validar los resultados esperados.

En relación con el Diseño y Enfoque se utilizó un diseño observacional para analizar el proceso actual y un enfoque longitudinal para evaluar los cambios a lo largo del tiempo. El enfoque cuantitativo incluyó la recopilación de datos sobre la cantidad de PVC desperdiciado y recuperado, mientras que el enfoque cualitativo se basó en entrevistas y observaciones para identificar las causas del desperdicio. Lo que ha mejorado la comprensión de los efectos de las mejoras implementadas y ha permitido tomar mejores decisiones para futuros cambios.

Para la recolección de los datos: se emplearon varias técnicas para la recolección de datos. En el enfoque cuantitativo, se utilizaron registros de producción para medir la cantidad de PVC desperdiciado antes y después de la implementación de las metodologías Lean. En el enfoque cualitativo, se realizaron entrevistas semiestructuradas con el personal clave y se llevaron a cabo observaciones directas del proceso, en un lapso de tiempos comprendidos entre octubre 2023– marzo 2024.

En lo referente a las consideraciones éticas en el estudio se respetaron las consideraciones éticas al obtener el consentimiento informado de todos los participantes y garantizar la confidencialidad y el uso ético de los datos recolectados. Se establecieron criterios de inclusión basados en la disponibilidad y relevancia del personal para el proceso de purgas, y criterios de exclusión basados en la falta de disponibilidad o interés en participar. Todo esto pone de manifiesto una práctica ética en la investigación.

En cuanto a las actividades ejecutadas durante este proyecto estas fueron basadas en la metodología DMAIC de seis sigma [29]. En el Cuadro 1 se muestra el detalle de las etapas desarrolladas.

Cuadro 1. Metodología de trabajo basada en las etapas del DMAIC de seis sigma.

Etapa	Actividades	Herramienta	Descripción	Responsables
Definir "Voz del cliente: Requerimiento de iniciativas que impulsen la reducción desechos"	Definir equipo multidisciplinario para revisar la viabilidad de los proyectos propuestos.	Focus group (lluvia de ideas, multivoto)	Se creó un equipo para lograr determinar las posibles oportunidades de ahorro dentro de la organización.	Gerente del proyecto Gerente de calidad Gerente de producción Country mánager
	Fundamentar la definición del proyecto por la organización.	Matriz Pick (impacto / esfuerzo)	Se utilizó esta herramienta para lograr determinar el impacto / esfuerzo de los proyectos vistos en el focus group	Gerente del proyecto Gerente de calidad Gerente de producción Country mánager Mejora continua
Medir "Análisis de la información obtenida y determinación de las causas de la problemática"	Recolectar los datos y determinar si hay desviación estadística que provoque un sesgo en la información	Estadística descriptiva (Grafica de barras, etc)	Se realizó un análisis de los datos obtenidos del sistema de reporte de producción.	Gerente del proyecto
Analizar "Definición de los planes de acción para el logro de la mejora"	Realizar el proceso de diagrama de Ishikawa con las diferentes variables del proceso.	Diagrama de Ishikawa	Se aplicó la herramienta lean Ishikawa para que el equipo definiera el enfoque a seguir.	Gerente del proyecto Gerente de calidad Gerente de producción Country mánager Mejora continua
	Determinar la causa de No recuperación de la purga de PVC.	"5 porqué" Entrevistas	Se determinó que la organización no contaba con un plan de gestión de residuos de PVC.	Gerente del proyecto

Etapa	Actividades	Herramienta	Descripción	Responsables
Implementar "Definir el proceso de implementación de la propuesta de recuperación"	Mediante el ciclo Deming, realizar la planeación del proyecto en las fases del PDCA.	Benchmarking Ciclo Deming ⁵ Stakeholders Analysis AMEF	Se determinaron las fases del proyecto.	Gerente del proyecto
	Crear el cronograma de tareas para la implementación y seguimiento del proyecto.	Cronograma Gantt	Se organizó la planeación del proyecto con el detalle de las tareas	Gerente del proyecto
	Creación de matriz RACI para la definición de Roles y responsabilidades.	Matriz RACI Diagramas de flujo A3 Anova	Se propusieron las responsabilidades y dueños del proceso.	Gerente del proyecto
Controlar "Planear el seguimiento correspondiente"	Definición de roles y responsabilidades de los dueños del proceso definido.	Stakeholders Analysis (Monitoreo de las partes interesadas)	Se definieron los responsables de la ejecución y seguimiento del proyecto.	Gerente del proyecto
	Ánalisis de riesgo y calificación de nivel de riesgo con sus acciones correctivas.	Matriz AMEF Visual management (Pizarra electrónica): Dashboard	Se determinaron los riesgos identificados en el proceso y su nivel de riesgo.	Gerente del proyecto

Resultados

Con motivo de extender la misma estructura utilizada en la sección anterior y guiar la secuencia lógica de las actividades, se presentan a continuación un resumen de los principales entregables que se produjeron en cada una de las etapas.

Definir

Luego de la definición del equipo de trabajo multidisciplinario liderado por el líder del proyecto. Se enlistaron mediante una lluvia de ideas [30], los posibles proyectos que tuvieran como finalidad un mejoramiento del medio ambiente. Seguidamente, mediante un multivoto [31] y la aplicación de la matriz pick (impacto/ esfuerzo) [32], se logró establecer aquellos proyectos considerados como clave (Figura 1)

5 Esta herramienta se utilizó para estructurar el proceso de mejora continua.

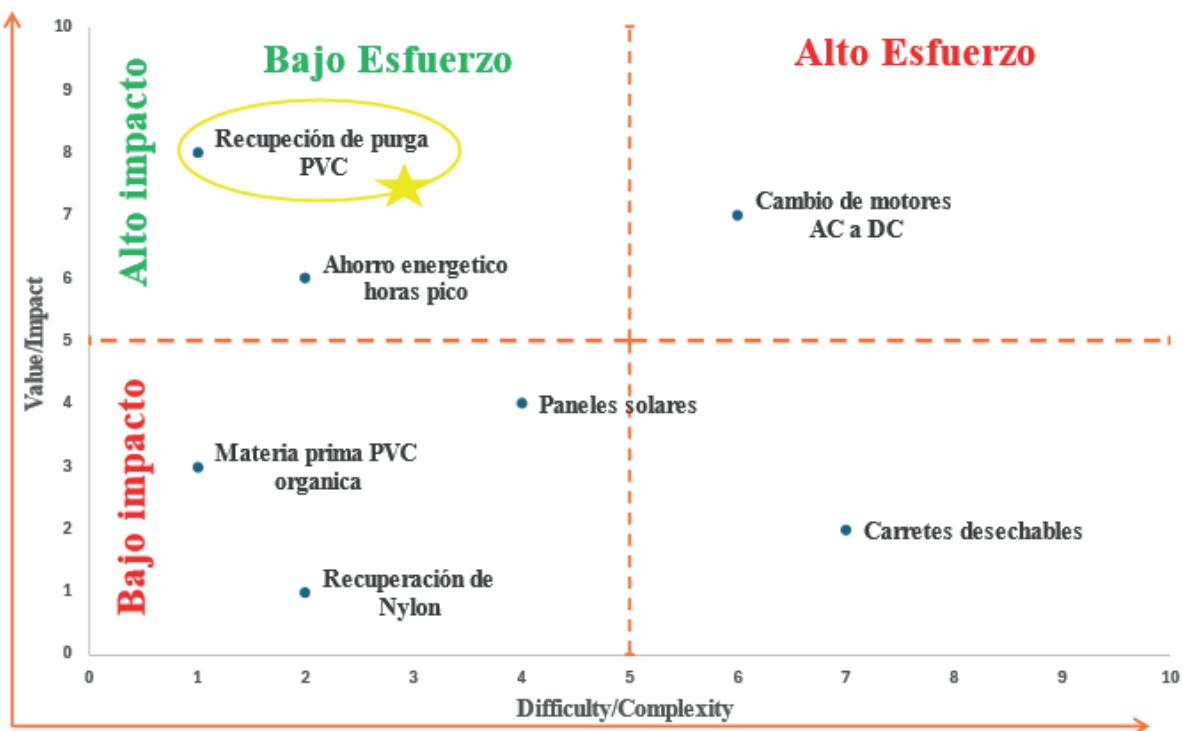


Figura 1. Resultado de la herramienta “Matriz de impacto / esfuerzo”.

En la matriz pick se denota que como equipo se decide abordar los proyectos con alto impacto y bajo esfuerzo el cual está ubicado en el cuadrante superior izquierdo siendo la iniciativa propuesta en este proyecto de investigación un proyecto de rápida implementación y de gran impacto. Finalmente, se consulta a las autoridades de la empresa, Gerencia General y Gerencia de Producción, para la obtención de su aprobación o visto bueno y valorar la asignación de recursos necesarios para el éxito del proyecto.

Medir

Para el cumplimiento de esta etapa se recolectaron datos de los registros de producción registrados en el sistema oficial institucional, MES, Sistema oficial de registro de producción [33] y los sistemas de seguimiento de residuos para recopilar datos sobre la cantidad de residuos de PVC generados y enviados al desecho. Posteriormente, se procedió al procesamiento y tabulación de estos datos utilizando la hoja de cálculo Microsoft Excel; con la finalidad de identificar patrones y/o tendencias y establecer la base o magnitud del problema a resolver (Figura 2)

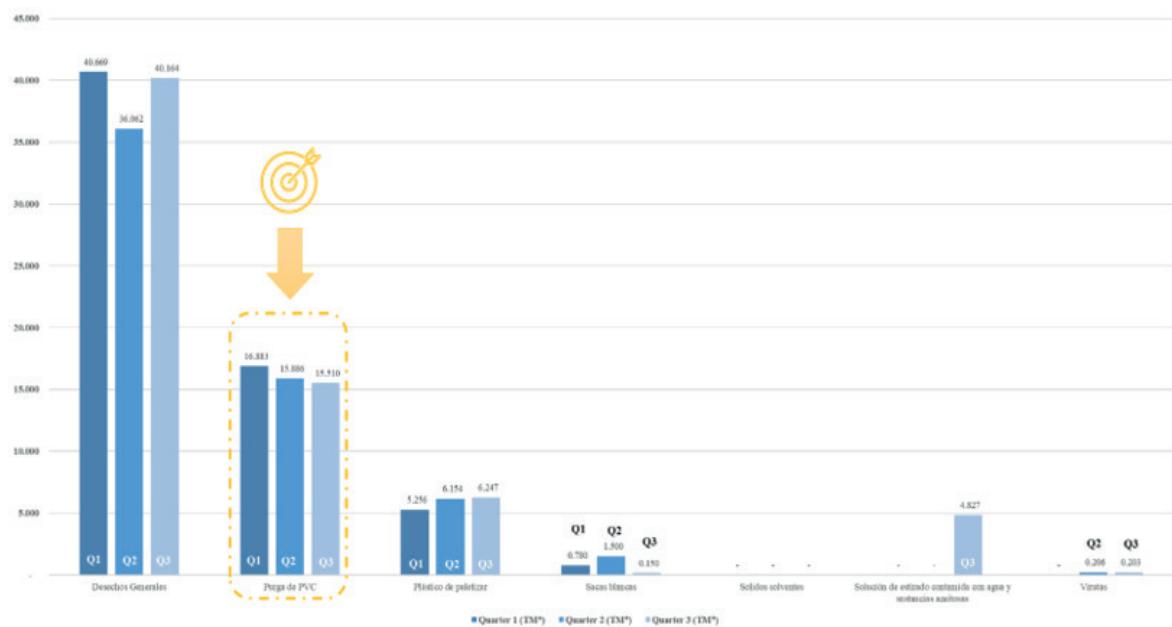


Figura 2. Toneladas métricas – Distribución anual de residuos.

En la Figura 2 se muestra la magnitud y evolución del control de residuos que tiene la organización y evidencia que en promedio por trimestre (Quarter) la organización desecha 16 toneladas métricas. Para un total aproximado al cierre del año de 64 toneladas aproximadamente que estarían en camino al desecho sanitario contaminando el medio ambiente, lo que equivale a 5.3 toneladas métricas mensuales. Cabe destacar que, ante lo anteriormente mencionado, existe un impacto adicional dado que la organización se ve obligada a realizar mayor compra de materia prima virgen lo cual hace que incurra mediante transporte marítimo y terrestre en aproximadamente 1460 kg de CO₂ desde el punto de origen del proveedor al país costarricense. Así mismo, es costo total de la no recuperación del PVC hace que la organización tenga un impacto de 190.106 dólares anuales (Tipo de cambio: 525 colones), los cuales incluyen costos de compras de la materia prima adicional, costos de importación, entre otros.

El tamaño de muestra seleccionada es de 12,652 registros transacciones registradas de desperdicio

Analizar

Con la finalidad de determinar las principales causas que ocasionan el problema planteado en la primera etapa, se realizó un Diagrama Ishikawa [34] (Figura 3)

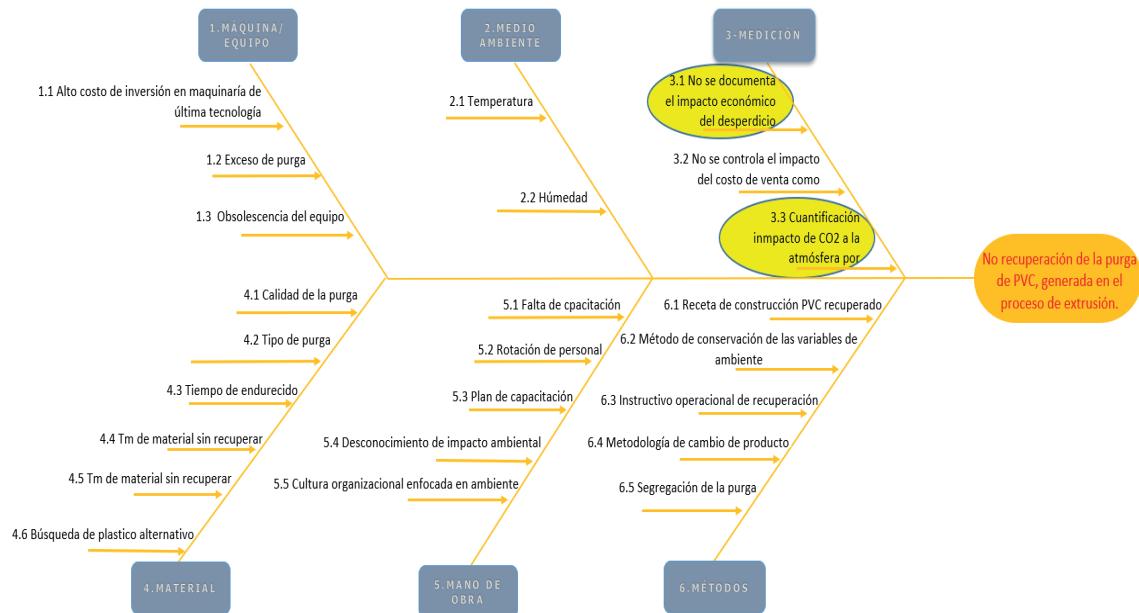


Figura 3. Resultado de la aplicación de la herramienta “Diagrama Ishikawa”.

Luego de un análisis particular para todas las causas presentadas; se identificaron tres como causantes principales de la problemática planteada en la etapa 1 (Figura 3 encerradas en un círculo amarillo). A continuación, se presenta una descripción de esas tres causas:

Causa identificada “no se documenta el impacto económico del desperdicio”:

Se refiere a la falta de registro o documentación adecuada sobre los costos asociados con el desperdicio de materiales o recursos en el proceso de producción. Esto implica que la empresa no tiene una comprensión clara de cuánto dinero se está perdiendo debido al desperdicio de materiales como el PVC en el proceso de extrusión de cobre. Esta falta de documentación puede ser problemática porque limita la capacidad de la empresa para evaluar el impacto económico real del desperdicio y tomar decisiones informadas para abordar el problema. Sin una comprensión clara de los costos asociados con el desperdicio, la empresa podría subestimar la magnitud del problema o no asignar recursos adecuados para implementar soluciones efectivas.

Para abordar esta causa identificada, sería necesario establecer sistemas de seguimiento y registro para documentar adecuadamente el impacto económico del desperdicio. Esto podría implicar la implementación de herramientas de contabilidad de costos específicas para rastrear los costos asociados con el desperdicio de materiales, así como la realización de análisis de costos-beneficios para evaluar el retorno de la inversión de implementar medidas de reducción de desperdicios. Además, sería importante educar al personal sobre la importancia de documentar adecuadamente el impacto económico del desperdicio y proporcionarles las herramientas y recursos necesarios para hacerlo de manera efectiva.

Causa identificada “no se cuantifica el impacto del CO2 a la atmósfera por recuperación”

Se refiere a la falta de evaluación o medición del impacto ambiental asociado con el proceso de no recuperación de PVC en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO2) a la atmósfera. Esto indica que la empresa no está realizando un seguimiento adecuado de las emisiones de CO2 resultantes de la recuperación de PVC y su impacto en el medio ambiente.

Esta falta de cuantificación del impacto ambiental puede ser preocupante, ya que limita la capacidad de la empresa para comprender y mitigar su huella de carbono. El CO2 es un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático, y las emisiones asociadas con el proceso de recuperación de PVC podrían tener un impacto significativo en la salud del medio ambiente.

Para abordar esta causa identificada, sería necesario implementar un sistema de seguimiento y medición de las emisiones de CO2 asociadas con el proceso de recuperación de PVC. Esto podría incluir la instalación de equipos de monitoreo de emisiones y el desarrollo de protocolos de medición estandarizados para registrar y cuantificar las emisiones de CO2 en diferentes etapas del proceso. Además, se podrían explorar estrategias para reducir las emisiones de CO2, como la optimización de procesos, la mejora de la eficiencia energética y la utilización de tecnologías más limpias y sostenibles.

Adicionalmente y con motivo de profundizar en el entendimiento del análisis de las causas raíz se aplicó la herramienta de “5 porqué” [35] (Cuadro 2)

Cuadro 2 Resultado de la aplicación de la herramienta de “5 porqué”.

Planteamiento del problema	Por qué 1	Por qué 2	Por qué 3	Por qué 4	Por qué 5
No recuperación de la purga de PVC generada en el proceso de extrusión	¿Por qué se generan residuos de PVC en el proceso de extrusión de cobre?	¿Por qué el PVC no se incorpora al producto final de manera eficiente?	¿Por qué no hay un método específico para recuperar el PVC?	¿Por qué no se ha implementado una estrategia de gestión de residuos?	¿Por qué no se ha reconocido plenamente la necesidad de abordar este aspecto de la sostenibilidad?
	Respuesta 1	Respuesta 2	Respuesta 3	Respuesta 4	Respuesta 5
	Porque parte del PVC utilizado en el proceso no se incorpora al producto final y se convierte en residuo. (Purga)	Porque no se cuenta con un método específico para recuperar el PVC durante el proceso de extrusión de cobre.	Porque no se ha implementado una estrategia de gestión de residuos focalizada en la recuperación de PVC en la organización.	Porque no se ha reconocido plenamente la necesidad de abordar este aspecto específico de la sostenibilidad en el proceso de extrusión de cobre.	Porque la empresa puede carecer de información completa sobre las implicaciones ambientales y económicas de la generación de residuos de PVC en el proceso.

En la matriz de 5 “por qué” se identificó que la organización actualmente no estaba dentro de su estrategia de sostenibilidad corporativa y por tanto el desecho generado se envía al residuo sin ningún análisis previo de recuperación.

Implementar

Diseño de plan

Como consecuencia del análisis de la etapa anterior. La organización en su afán de realizar una reducción de la contaminación de sus procesos decide crear una estrategia de gestión de residuos de PVC. Por lo anterior, el Gerente del proyecto realizó inicialmente un proceso de benchmarking con las otras plantas de LATAM que tienen un proceso similar al de la

organización para identificar buenas prácticas de recuperación de residuos de PVC previo a la etapa inicial del proyecto. Seguidamente, se decide crear una herramienta general para mostrar la idea global del proyecto (Cuadro 3)

Cuadro 3. Resumen del proyecto de mejora mediante el ciclo Deming [36] (Visión global).

Etapas Ciclo Deming

	Plan (Planificar)	Do (Hacer):	Check (Verificar):	Act (Actuar):
Objetivo	Desarrollar e implementar un sistema de gestión de residuos centrado en la recuperación de PVC.	Implementar el sistema de gestión de residuos planificado y realizar las acciones específicas para recuperar el PVC durante el proceso de extrusión de cobre.	Evaluar la eficacia del sistema de gestión de residuos implementado y recopilar datos para analizar el impacto en la generación de residuos de PVC.	Tomar medidas correctivas basadas en los resultados de la fase de verificación y continuar mejorando el sistema de gestión de residuos.
Acciones:	•Identificar los puntos críticos de generación de residuos de PVC en el proceso.	•Instalar equipos y tecnologías necesarios para la recuperación de PVC.	•Monitorear continuamente la cantidad de residuos de PVC generados.	•Analizar los datos recopilados para identificar áreas de mejora.
	•Investigar tecnologías y métodos eficientes para la recuperación de PVC.	•Implementar procedimientos de clasificación y recolección de residuos en el proceso.	•Realizar auditorías para verificar el cumplimiento de los procedimientos.	•Implementar mejoras continuas en el sistema de gestión de residuos de PVC.
	•Diseñar un plan detallado para la implementación de un sistema de gestión de residuos de PVC.	•Capacitar al personal sobre las nuevas prácticas de gestión de residuos.	•Recopilar datos sobre el rendimiento del sistema de gestión de residuos.	•Ajustar el plan según sea necesario para optimizar la eficiencia y reducir aún más la generación de residuos.

Seguidamente al resumen anterior. Se procedió a brindar mayor detalle de las acciones o actividades a implementar, así, en la Figura 4 y la Cuadro 4 se muestra la estructura detallada de trabajo [37] y un resumen de las actividades, respectivamente.

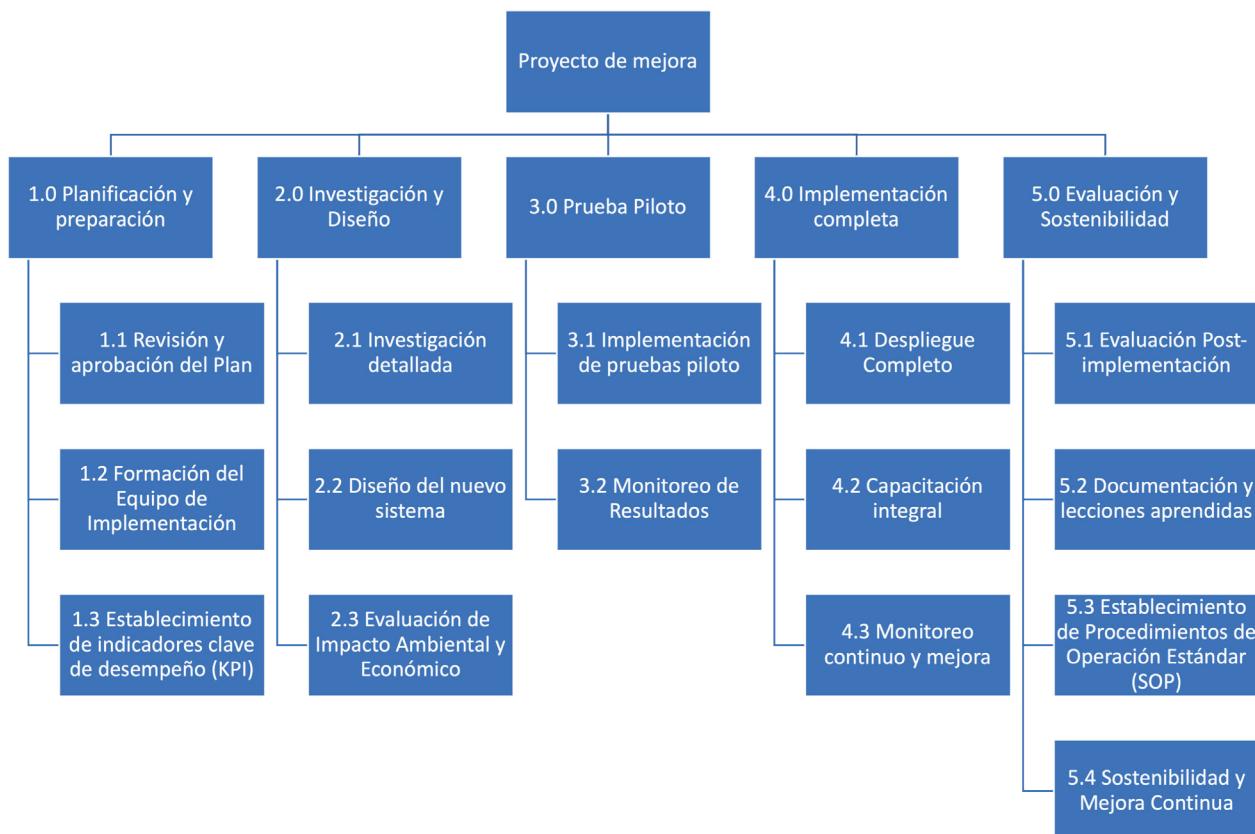


Figura 4. Resultado de la aplicación de la herramienta “Estructura detallada de trabajo”.

Cuadro 4. Resumen de las actividades de la estructura detallada de trabajo.

Etapa	Actividad	Descripción
Etapa 1: Planificación y Preparación	1.1. Revisión y Aprobación del Plan:	Desarrollar un plan detallado que incluya objetivos, alcance, recursos necesarios, cronograma y presupuesto. Obtener la aprobación del plan por parte de la dirección y otras partes interesadas clave.
	1.2. Formación del Equipo de Implementación:	Seleccionar y capacitar a un equipo de implementación que incluya expertos en ingeniería de procesos, gestión de residuos, personal de producción, y otros roles clave.
	1.3. Establecimiento de Indicadores Clave de Desempeño (KPI):	Definir KPI específicos para evaluar el éxito de la implementación, como la reducción de residuos, eficiencia operativa y cumplimiento ambiental.
Etapa 2: Investigación y Diseño	2.1 Investigación Detallada:	Realizar una investigación más detallada sobre las tecnologías de recuperación de PVC, regulaciones ambientales, y requisitos específicos del proceso de extrusión de cobre de Prysmian Group.
	2.2 Diseño del Nuevo Sistema:	Desarrollar un diseño detallado del nuevo sistema de gestión de residuos, incluyendo la integración de tecnologías, procedimientos operativos (SOP) y requisitos de infraestructura.
	2.3 Evaluación de Impacto Ambiental y Económico:	Realizar una evaluación detallada del impacto ambiental y económico del nuevo sistema, considerando factores como la reducción de residuos, ahorros de costos y cumplimiento normativo.
Etapa 3: Pruebas Piloto	3.1. Implementación de Pruebas Piloto:	Realizar pruebas piloto a pequeña escala para validar la eficacia del nuevo sistema y realizar ajustes según sea necesario.
	3.2 Monitoreo de Resultados:	Monitorear cuidadosamente los resultados de las pruebas piloto, recopilando datos sobre la eficiencia operativa, la calidad del producto y la reducción de residuos.
Etapa 4: Implementación Completa	4.1. Despliegue Completo:	Implementar el nuevo sistema de gestión de residuos en todas las líneas de producción de extrusión de cobre de Prysmian Group.
	4.2. Capacitación Integral:	Proporcionar capacitación extensiva al personal sobre los cambios en los procedimientos y la operación del nuevo sistema.
	4.3. Monitoreo Continuo y Mejora:	Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento del nuevo sistema y realizar mejoras continuas según sea necesario.
Etapa 5: Evaluación y Sostenibilidad	5.1. Evaluación Post- Implementación:	Evaluuar los resultados post-implementación en comparación con los KPI establecidos.
	5.2. Documentación y Lecciones Aprendidas:	Documentar el proceso de implementación, incluyendo desafíos encontrados, soluciones aplicadas y lecciones aprendidas.
	5.3. Establecimiento de Procedimientos de Operación Estándar (SOP):	Desarrollar SOP para la gestión continua del nuevo sistema, asegurando la consistencia y la calidad a lo largo del tiempo.
	5.4. Sostenibilidad y Mejora Continua:	Implementar prácticas de mejora continua y sostenibilidad a largo plazo, asegurando que el sistema se mantenga eficiente y adaptado a cambios en el entorno operativo.

Posteriormente, con la claridad de las actividades a desarrollar en el proyecto, se continuó con la asignación de responsables entre los miembros del equipo del proyecto. De esta forma se creó una Matriz de Responsabilidades (RACI) [38] para hacer el proyecto sostenible en el tiempo (Cuadro 5).

Cuadro 5. Matriz RACI del proyecto de mejora.

Actividad/Entregable	Responsable (R)	Aprobador (A)	Consultado (C)	Informado (I)
1. Investigación y Análisis Inicial	Gerente del Proyecto	Gerente de Planta Country Manager		
2. Diseño del Sistema de Gestión de Residuos	Gerente del proyecto	Gerente de Planta	Especialista en Medio Ambiente Ingeniero de procesos	
3. Pruebas Piloto	Gerente del proyecto Ingeniero de procesos	Gerente de Calidad Gerente de Planta	Equipo de Producción R&D	Todo el Personal
4. Capacitación del Personal	Gerente del proyecto Especialista en Capacitación	Gerente de Recursos Humanos Gerente de Planta	Ingeniero de Procesos Operador	Operador de producción
5. Monitoreo y Evaluación Continua	Gerente del proyecto Mejora continua	Gerente de Operaciones	Especialista en Medio Ambiente	Todo el Personal
6. Retroalimentación y Mejora Continua	Gerente del Proyecto Mejora Continua	Gerente de Calidad Gerente de Planta	Gerente del Proyecto	Todo el Personal
7. Comunicación Externa	Gerente del Proyecto Especialista en Comunicación	Gerente de Recursos Humanos		Todo el Personal

Finalmente se desarrolló un cronograma mediante el diagrama de Gantt [39] para brindar seguimiento a la ejecución de todas las actividades planteadas (Figura 5)



Figura 5. Resultado de la aplicación de la herramienta “Diagrama de Gantt”

Ejecución del plan

Como parte de la evidencia de las acciones implementadas en este proyecto se resumen a continuación las consideradas como principales:

- Adquisición de un molino especializado para la trituración y molienda del PVC recuperado

Luego de un estudio exhaustivo de diferentes tecnologías en donde se valoraron criterios como la eficiencia, la capacidad de procesamiento, la calidad del producto final y la compatibilidad con el proceso de extrusión de cobre (criterios técnicos y operativos). Se selecciona el molino especializado que fue integrado en la planta de producción de Prysmian Group, permitiendo así la trituración y molienda eficiente del PVC recuperado para su posterior reutilización en el proceso de extrusión de cobre. El mismo representó un costo de \$5.500 el cual se adaptó para la función requerida en conjunto con el área de mantenimiento, adicional se definió los parámetros de seguridad para el uso correcto del equipo con el equipo de seguridad y salud ocupacional (Figura 6)



Figura 6. Molino Molienda Conair.

- Desarrollo de procedimientos Operativos estándar (SOP)

Estos procedimientos se elaboraron para las tareas de generación de molienda y recuperación en la planta de PVC. Fueron elaborados en base a las mejores prácticas de la industria y la experiencia específica del equipo de operaciones de Prysmian Group. Los SOP definieron claramente los pasos a seguir para la operación del molino, así como los procedimientos para la manipulación segura y eficiente del PVC recuperado. Además, se incluyeron pautas detalladas para la supervisión y control de calidad del proceso de molienda, garantizando así la consistencia y la calidad del producto final (Figura 7).

STANDARD OPERATING PROCEDURE (SOP)

AUTHOR: Juan Arias DATE: 11-Sep REVISION NO.: 0 REVISION DATE: 0 STATUS: Activo

< SOP - Recuperación de Purga de PVC >

Process Name	Parent Process	SOP Owner	Process Time
Recuperación de Purga de PVC	Proceso de producción en extrusión	Gerente de producción	Durante el proceso productivo, sujeto a necesidad de recuperación
Purpose		Scope	
Estandarizar los pasos de recuperación de purga de PVC, con el objetivo de mantener esta práctica implementada durante el tiempo. Esta guía funciona como entrenamiento para personal de nuevo ingreso.		Proceso de extrusión Cambio de producto (Purga de extrusora)	
Definitions and Abbreviations		Responsibilities	
1 PVC - cloruro de polivinilo 2 Purga - Residuos que en algunas operaciones industriales o en los artefactos se acumulan y se han de eliminar o expeler		Operador de producción - Encargado de ejecutar los procesos definidos. Supervisor - Encargado de velar por el cumplimiento del proceso definido.	
Process Steps		Process Map	
1 Limpieza del tornillo de extrusión (Purga) por cambio de producto 2 Recolección de la purga de extrusión 3 Realizar el proceso de molido de purga de extrusión (Molienda) 4 Colocar la molienda en su caja respectiva (Kanban)			
Related SOPs and Documents		Distribution List	
SOP Proceso de producción SOP Entrenamiento de personal operativo - Extrusión		Departamento de producción Departamento de ingeniería de procesos Entrenamiento de personal	Monday, September 11, 2023 Monday, September 11, 2023 Monday, September 11, 2023
Issued by Revised by Authorized by	Name Juan Arias Jonathan Vega Jonathan Vega	Signature 	Date Monday, September 11, 2023 Monday, September 11, 2023 Monday, September 11, 2023

STANDARD OPERATING PROCEDURE (SOP)

AUTHOR: Juan Arias DATE: 16-Oct REVISION NO.: 0 REVISION DATE: 0 STATUS: Activo

< SOP - Recuperación de Purga de PVC >

Process Name	Parent Process	SOP Owner	Process Time
Recuperación de Molienda PVC	Proceso de producción Planta de PVC	Gerente de producción	Durante el proceso productivo, sujeto a necesidad de recuperación
Purpose		Scope	
Estandarizar los pasos de recuperación de molienda de PVC, con el objetivo de mantener esta práctica implementada durante el tiempo. Esta guía funciona como entrenamiento para personal de nuevo ingreso.		Proceso de producción Planta de PVC Kanban lleno (Molienda PVC)	
Definitions and Abbreviations		Responsibilities	
1 PVC - cloruro de polivinilo 2 Purga - Residuos que en algunas operaciones industriales o en los artefactos se acumulan y se han de eliminar o expeler		Operador de producción - Encargado de ejecutar los procesos definidos. Supervisor - Encargado de velar por el cumplimiento del proceso definido.	
Process Steps		Process Map	
1 Setup Extrusora de PVC: Limpieza de filtro de extrusora 2 Ajuste de tolva de carga, para succionar a tolva auxiliar 3 Encendido de tolva Auxiliar 4 Limpieza de Malla de extrusora 5 Colocar caja de recibo de PVC recuperado 6 Purga de limpieza de Amasador 7 Se toma la molienda del punto de Kanban definido 8 Se inserta la manguera cargadora que esta conectado a la tolva auxiliar 9 Se realiza el cambio de bomba, a la tolva auxiliar en la PC de la máquina. # Se verifica el cargado de la tolva para el arranque de la recuperación. # Inicio de recuperación # PVC recuperado			
Related SOPs and Documents		Distribution List	
SOP Proceso de producción - Planta de PVC SOP Entrenamiento de personal operativo - Planta de PVC		Departamento de producción Departamento de ingeniería de procesos Entrenamiento de personal	Monday, October 16, 2023 Monday, October 16, 2023 Monday, October 16, 2023
Issued by Revised by Authorized by	Name Juan Arias Jonathan Vega Jonathan Vega	Signature 	Date Monday, October 16, 2023 Monday, October 16, 2023 Monday, October 16, 2023

Figura 7. Resumen de Procedimientos estándar para la recuperación de molienda.

- Elaboración de prototipo

Se realizó en conjunto con personal de las áreas de producción e ingeniería de procesos el protocolo de pruebas para aprovechar la primera producción de molienda (PVC molido) dentro de la planta de PVC⁶, obteniendo como producto final PVC procesable nuevamente al proceso productivo en conductores con cubierta negra (Figura 8).



Figura 8. Primera producción de molienda.

Posteriormente, se estableció el mapa del proceso estándar para que sea reproducible (Figura 9).

Cabe destacar que posteriormente a la aplicación de los pasos mostrados en la Figura 9 se obtienen dos productos. Por un lado, se obtiene la Molienda de PVC, el cual es el resultado de aplicar el proceso del molino sobre la purga previo a su salida de la cabeza de extrusión. Este material se acumula en cajas de 800kg aproximadamente para mayor aprovechamiento del espacio y tiempo de producción de la planta de PVC. Y una vez hecho el proceso de recuperación se obtiene el PVC recuperado y en el 100% de los casos es color negro, ya que el pigmento que prevalece es el de color negro. Siendo esto motivo que el proyecto de recuperación solo sea aplicable en la cubierta de conductores de esta coloración. A continuación, se detalla los cambios que sufre el PVC al aplicar el proceso definido en cuestión (Figura 10).

6 La idea es utilizar este PVC recuperado en productos con PVC tipo 60° y chaquetas de conductores TGP.



Figura 9. Descripción del proceso de Molienda para obtener el PVC recuperado



Figura 10. Tipos de PVC.

Resultados de la ejecución del plan

La ejecución del plan brindó mejoría en cuatro indicadores considerados como clave. En el Cuadro 6 se muestra sus descripciones.

Cuadro 6. Indicadores claves del desempeño.

Indicador clave	Fórmula
% reducción de desechos enviados al residuo sanitario	$\left(\frac{\text{Desechos recuperados en kg (purga)}}{\text{Desechos totales en kg}} \right) * 100$
% Personal capacitado en la recuperación de PvC	$\left(\frac{\# \text{ Total de personal capacitado en Extrusión}}{\# \text{ Total de personal de Extrusión}} \right) * 100$
% de Reducción del costo	$\left(\frac{\text{Producción con molienda} * \text{costo de molienda recuperada}}{\text{Producción con PVC virgen} * \text{costo de PVC virgen}} \right) * 100$
CO2 reducidas en la atmósfera	$\text{Rate de CO2} * \text{tonelada métricas recuperadas}$

A continuación, se presenta un resumen de las magnitudes de las mediciones planteadas anteriormente en el Cuadro 6.

- Medición de la reducción de desechos enviados al residuo sanitario:

Se logró una reducción significativa en la cantidad de desechos de PVC⁷ enviados al residuo sanitario. Esta reducción se tradujo en una disminución notable de los costos asociados con la eliminación de residuos y contribuyó a la mejora del impacto ambiental de la planta de producción (Figura 11)

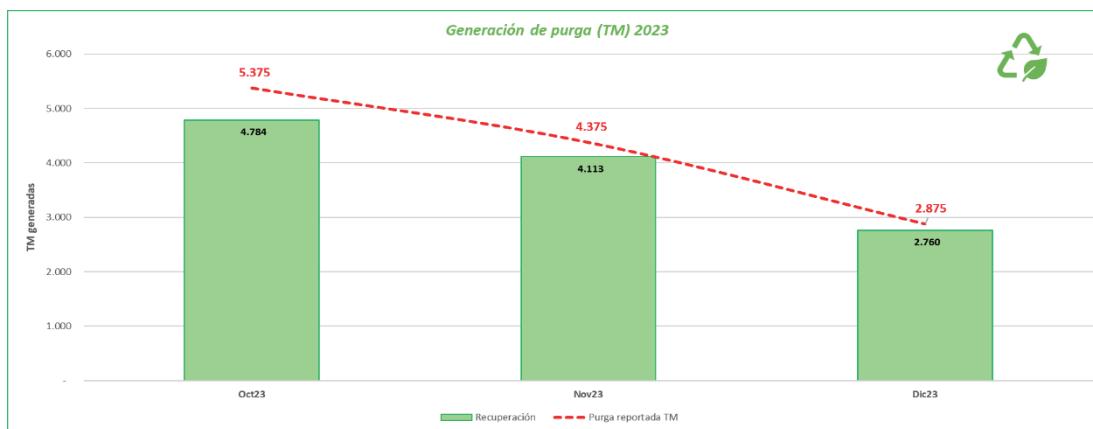


Figura 11. Resultados de la reducción de desechos enviados a residuo.

7 Se realizó una prueba anova de un factor (antes y después) cuyo valor respuesta fue la cantidad de desperdicio del PVC. El resultado fue significativo al obtener un valor del valor p de 0.011. Por lo que se demuestra estadísticamente, que hubo una disminución en el desperdicio del PVC. La prueba se realizó con un nivel de confianza del 95%.

- Personal capacitado en el proceso de recuperación de PVC:

Se desarrolló un plan de entrenamiento integral basado en los SOP y en las necesidades específicas del personal de operaciones. Este plan de capacitación permitió elevar el nivel de competencia y conocimiento del personal en el proceso de recuperación de PVC, mejorando así la eficiencia y la efectividad de las operaciones. El cumplimiento que se logró fue del 100%.

- Medición de reducción de costo de producción por el uso de material recuperado:

La implementación de la solución resultó en una reducción significativa de los costos de producción debido al uso de material recuperado en el proceso de extrusión de cobre. Esta reducción de costos mejoró la rentabilidad general del proceso y aumentó el margen de contribución en los productos fabricados con material recuperado. La reducción alcanzada fue de un 23.7%

- Medición de impacto CO2 por reducción de compra de PVC virgen.

Basado en la estimación anterior, el rate de CO2 por tonelada métrica es de 0.073 toneladas de CO2/ toneladas métricas si tomamos que el proyecto plantea una recuperación efectiva del 92% del material generado en el proceso de extrusión y se define una estimación de recuperación de 56 toneladas métricas anual nos refleja una reducción de 4 toneladas métricas de CO2 a la atmósfera para el año 2024.

Controlar

Para garantizar la sostenibilidad de la solución en el tiempo, se implementaron medidas específicas de seguimiento y monitoreo. Se establecieron indicadores clave de rendimiento (KPI's) para evaluar continuamente el desempeño del proceso de recuperación de PVC y se programaron revisiones periódicas para identificar oportunidades de mejora. Además, se designaron responsables específicos para supervisar y mantener el funcionamiento óptimo del sistema, y se fomentó una cultura de mejora continua dentro de la organización para asegurar que la solución se mantenga efectiva y eficiente a lo largo del tiempo. Adicionalmente, como parte de los resultados obtenidos post-implementación, durante los meses de OCT a DIC 2023 se logró una recuperación total de 11.6 toneladas métricas de 12.6 Toneladas métricas de Purga de PVC. Esto representa un 92% de Purga recuperada siendo aprovechada en cubiertas para conductores logrando aplicar un concepto de economía circular y cuidando el ambiente.

El proceso de control del proyecto se llevó a cabo mediante una consulta en BI donde les permita a los actores del proceso conocer el avance y el impacto de su recuperación y hacerlos sentirse parte importante de mantener el proyecto en el tiempo. La revisión de resultados se llevó mediante el registro de producción en el sistema MES de la recuperación de la Purga de PVC en la planta de PVC, registrado de forma diaria por los colaboradores de producción. Esto logra el monitoreo a nivel de sistema mediante un sistema de BI que alimenta el dato de las pizarras arriba mencionadas. El proyecto durante el proceso de aseguramiento es vital tener al equipo necesario involucrado para lograr la sostenibilidad en el tiempo, por lo cual se construyó un stakeholders Analysis [40] para tener claro los intereses, influencias y expectativas de los principales autores.

Monitoreo de las partes interesadas

El sistema de monitoreo es vital para el proyecto y la idea es mediante pizarras electrónicas mostrar al personal esta información de la recuperación de Purga de PVC diaria y mostrar de forma acumulada un cálculo del impacto en CO2. Mensualmente, se realizó un despliegue del

avance del proyecto a los stakeholders donde se permitió crear una referencia de la evolución del proyecto y se recibió retroalimentación por partes de ellos para la mejora continua (Ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Stakeholders Analysis (Monitoreo de las partes interesadas).

Stakeholder	Intereses	Influencia	Expectativas
Equipo de Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuir con conocimientos y habilidades. - Éxito general del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - En la implementación de acciones específicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Colaboración efectiva y reconocimiento de contribuciones.
Líder del Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - Alcanzar objetivos estratégicos. - Sostenibilidad a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre la dirección general del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Resultados alineados con visión estratégica de la empresa. - Cumplimiento de los objetivos del proyecto
Responsable de Calidad	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento de estándares de calidad. - Eficacia y eficiencia de soluciones propuestas en el proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - En la implementación y procesos de mejora continua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cumplimiento de estándares y mejora continua.
Gerente de Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Integración efectiva de soluciones. - Eficiencia operativa proceso LEAN. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre la integración de procesos operativos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptación efectiva de mejoras en las operaciones.
Mejora Continua	<ul style="list-style-type: none"> - Monitoreo continuo de KPIs. - Proporcionar análisis para decisiones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre la selección y seguimiento de KPIs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso a datos precisos y capacidad de análisis.
Auditor Interno	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar cumplimiento de estándares. - Identificar posibles desviaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - En realización de auditorías y evaluación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Información precisa y acción correctiva eficaz.
Comité de comunicación	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación efectiva y transparente. - Gestión de percepción y reputación de la idea del proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sobre estrategia y canales de comunicación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicación clara y oportuna.
Responsable de sistemas de gestión	<ul style="list-style-type: none"> - Registro preciso de acciones y resultados. - Facilitar aprendizaje continuo mediante la estandarización documental. 	<ul style="list-style-type: none"> - En creación y mantenimiento de documentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Documentación detallada y accesible.
Cultura organizacional	<ul style="list-style-type: none"> - Éxito del proyecto a largo plazo. - Desarrollo de una cultura de mejora continua. 	<ul style="list-style-type: none"> - A través de colaboración y apoyo mutuo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Compromiso y participación activa de todo el equipo.

Pizarra electrónica

El sistema de monitoreo fue fundamental para el proyecto y la idea fue mediante pizarras electrónicas mostrar al personal esta información de la recuperación de Purga de PVC diaria y mostrar de forma acumulada un cálculo del impacto en CO2. Mensualmente, se hizo un despliegue del avance del proyecto a los stakeholders donde se permitía crear una referencia de la evolución del proyecto y poder recibir retroalimentación por partes de ellos para la mejora continua (Figura 12).



DASHBOARD DE RECUPERACIÓN DE MOLIENDA

DICIEMBRE 2023



Figura 12. Pizarra de control.

Análisis modal de fallos y efectos (AMFE[41])

La revisión de riesgos se analizó mediante una matriz AMFE con escala del 1 al 5, donde 1 es menos grave/bajo y 5 más grave/alto según el ítem en la herramienta.

El valor de Nivel de riesgo (N) se define en base a la multiplicación de los 3 factores: Gravedad x Ocurrencia x Detección = Nivel de riesgo.

Cuadro 8. Análisis modal de fallos y efectos.

No.	Riesgo	Modo de Falla	Gravedad (G)	Ocurrencia (O)	Detección (D)	Nivel de Riesgo (N)	Acciones de mitigación
1	Tecnologías no Pruebas	Ineficacia de nuevas tecnologías	4	3	2	24	<ul style="list-style-type: none"> Realizar pruebas piloto antes de la implementación. Consultar con expertos en la industria para validación.
2	Fallas en el Equipoamiento	Interrupción del proceso	5	2	3	30	<ul style="list-style-type: none"> Implementar programas de mantenimiento preventivo. Mantener inventarios estratégicos de repuestos.
3	Resistencia al Cambio	Baja adopción de nuevas prácticas	3	4	2	24	<ul style="list-style-type: none"> Desarrollar programas de capacitación y concientización. Incluir al personal en la planificación y toma de decisiones.
4	Interrupciones en la Cadena de Suministro	Escasez de materiales clave	4	3	3	36	<ul style="list-style-type: none"> Establecer relaciones sólidas con proveedores. Mantener inventarios estratégicos para reducir dependencia.
5	Variabilidad en Costos	Aumento inesperado en los costos	4	3	2	24	<ul style="list-style-type: none"> Realizar análisis de costos detallados. Establecer un fondo de contingencia para imprevistos.

Esto permitió determinar uno de los riesgos más altos es las interrupciones en la cadena de suministro para poder fabricar el PVC recuperado, que ocasionaría una acumulación de Purga de PVC obligando a la organización a disponer como desecho por un tema de espacio en las bodegas.

El equipo de recuperación de Purga de PVC definido fue incluido dentro del mantenimiento preventivo con el fin de evitar fallos en el equipo que comprometa la recuperación de la Purga de PVC. Ambos riesgos con mayor nivel de riesgo son conocidos por los involucrados del proceso con la idea de generar conciencia y estar atentos a ambas situaciones en todo momento. La parte de resistencia al cambio y otras variables, son riesgos controlados con el seguimiento definido en las etapas y cronograma del proyecto. En el caso de la resistencia al cambio, se está mitigando con la idea de que el personal se empodere del proyecto y para ellos sea una ayuda al medio ambiente de su parte.

La consolidación de la solución propuesta en el tiempo en el proyecto de recuperación de purga de PVC implica la implementación de estrategias y prácticas que aseguren la sostenibilidad y la mejora continua. Para las cuales definimos en este proyecto pilares que serán claves para el éxito en el tiempo y a continuación les detallo:

- Integración en la Cultura Organizacional:

Hay que asegurar que la recuperación del PVC y las prácticas sostenibles se integren en la cultura organizacional. Esto implica fomentar una mentalidad de responsabilidad ambiental en todos los niveles de la empresa.

- Capacitación Continua:

Se establece un proceso de capacitación continua para el personal en nuevas tecnologías, procesos y prácticas. Mantener al equipo actualizado sobre las mejores prácticas en la recuperación del PVC y la gestión de residuos.

- Monitoreo y Evaluación Constante:

Se estableció un sistema de monitoreo y evaluación constante para los indicadores clave de rendimiento (KPI's). Se programa realizar revisiones mensuales para evaluar el rendimiento y la efectividad de la solución implementada.

- Responsabilidad Compartida:

Se promovió un ambiente de responsabilidad compartida en todos los niveles de la organización. Es de suma importancia involucrar a los empleados en la toma de decisiones y en la implementación de prácticas sostenibles para que se sientan parte integral del proceso.

- Comunicación Transparente:

Se mantiene una comunicación transparente con todas las partes interesadas, incluidos los colaboradores. Se comparte regularmente los logros y los desafíos futuros relacionadas con la recuperación de purga de PVC.

- Reconocimiento y Recompensas:

Se establece un programa de incentivo, el cual tiene un papel de suma importancia, reconocer el rendimiento excepcional en la implementación de prácticas sostenibles. Con el fin de motivar al personal y fortalecer el compromiso con la solución propuesta.

Para lograr una consolidación exitosa en el tiempo requiere se debe mantener un enfoque amplio que involucre aspectos culturales, operativos y de gestión. La sostenibilidad a largo plazo dependerá de la capacidad de la organización para adaptarse a cambios, aprender de la experiencia y mantener un compromiso constante con la mejora continua, responsabilidad ambiental y cumplimiento de KPI establecidos.

Los resultados obtenidos tras la implementación de las metodologías Lean demostraron una reducción significativa en el desperdicio de PVC. Antes de la implementación, el promedio mensual de PVC desperdiciado era de aproximadamente 500 kg. Después de la implementación, esta cifra se redujo a 150 kg, lo que representa una disminución del 70%.

Conclusiones y recomendaciones

Como parte de las conclusiones:

- La aplicación de la metodología Lean Six Sigma bajo el enfoque DMAIC demostró ser altamente efectiva para reducir el desperdicio de PVC en la empresa Conducen SRL, con una recuperación del 92% del material purgado, mejorando tanto la eficiencia operativa como el desempeño ambiental de la organización.
- La investigación evidenció que muchas de las causas del desperdicio eran atribuibles a la ausencia de documentación sistemática y a la falta de un plan formal de recuperación y reciclaje, lo cual fue corregido mediante herramientas como Ishikawa, 5 porqués y AMEF.
- La implementación de mejoras estructuradas, incluyendo la adquisición de un molino especializado, la capacitación integral del personal, y la estandarización de procedimientos (SOP), permitió convertir el residuo en materia prima reutilizable en la producción de conductores eléctricos con cubierta negra.
- El proyecto no solo trajo beneficios económicos, reduciendo en un 23.7% los costos de producción, sino que también logró una disminución de 4 toneladas métricas de CO₂, alineando a la empresa con los principios de la economía circular y los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).
- La experiencia demostró que el liderazgo del proyecto, el compromiso del personal y el monitoreo con herramientas visuales y digitales (como BI y pizarras electrónicas) son claves para sostener los logros en el tiempo.

Como parte de las recomendaciones:

- Replicar la metodología empleada en otros procesos internos, particularmente en otras líneas de extrusión o materiales con potencial de recuperación.
- Generar un repositorio interno de buenas prácticas y estandarizar proyectos similares con documentación facilitando la escalabilidad del enfoque.

Referencias

- [1] "DMAIC Process: Define, Measure, Analyze, Improve, Control | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/dmaic>
- [2] A. E. H., "Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible*", *Revista de Economía Institucional*, vol. 25, núm. 49, pp. 109–134, 2023.
- [3] M. Marcelino-Aranda *et al.*, "La economía circular como alternativa hacia un nuevo modelo para la actividad industrial sustentable", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 35, núm. 3, pp. 195–206, sep. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i3.5599.
- [4] S. King y K. E. S. Locock, "A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review", *Journal of Cleaner Production*, vol. 364, p. 132503, sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132503.
- [5] M. J. V. Ulloa y L. R. Virgen, "El reciclaje de plásticos, un reto para lograr una economía circular", *CEDAMAZ*, vol. 12, núm. 2, Art. núm. 2, dic. 2022, doi: 10.54753/cedamaz.v12i2.1265.

- [6] D. G. Bucknall, "Plastics as a materials system in a circular economy", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 378, núm. 2176, p. 20190268, jul. 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0268.
- [7] "Mercado Latinoamericano de Tubos de PVC, Informe | Análisis 2025-2034". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-latinoamericano-de-tubos-de-pvc>
- [8] "Tamaño del mercado de cloruro de polivinilo, informe, participación y tendencias de crecimiento en 2030". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.ar/industry-reports/polyvinyl-chloride-pvc-market>
- [9] "Brasil se consolida como potencia global en la industria del plástico y amplía su presencia internacional", PLASTICO. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/brasil-se-consolida-como-potencia-global-en-la-industria-del-plastico-y-amplia-su>
- [10] "Plástico Brasil 2025: es la quinta industria del país, mueve u\$s22.100 millones y tiene 14.200 empresas", Ambito. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambito.com/energia/plastico-brasil-2025-es-la-quinta-industria-del-pais-mueve-us22100-millones-y-tiene-14200-empresas-nº126904>
- [11] "North America PVC Pipes Market Size, Share | Report 2034", Claight Corporation (Expert Market Research). Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/north-america-pvc-pipes-market>
- [12] "Iniciativa latinoamericana recicla residuos PVC para evitar su disposición en rellenos sanitarios", Alianza Empresarial para el Desarrollo. Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aedcr.com/>
- [13] "Reciclaje de PVC en Costa Rica - CentralAmericaData :: Central America Data". Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://m.centralamericanadata.com/es/article/home/Reciclaje_de_PVC_en_Costa_Rica
- [14] S. S. G, "TEC promueve la reincorporación de residuos al sistema productivo nacional", Hoy en el TEC. Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2022/03/31/tec-promueve-reincorporacion-residuos-sistema-productivo-nacional>
- [15] R. L. Republica, "Recuperación del 80% del plástico en el mercado de bebidas une a Fundación ALIARSE y Costa Rica Recupera", Periodico La República. Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/recuperacion-del-80-del-plastico-en-el-mercado-de-bebidas-une-a-fundacion-aliarse-y-costa-rica-recupera/>
- [16] B. Camarillo, "¿Cómo la industria plástica en Costa Rica puede reinventarse hacia la sostenibilidad? Innovoplast 2024 lo descifra", Periodico La República. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/innovoplast-2024-descifro-como-la-industria-plastica-en-costa-rica-puede-reinventarse-hacia-la-sostenibilidad/>
- [17] "Revalorizar el PVC: clave para reducir residuos y costos". Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistaclevel.com/revalorizar-el-pvc-clave-para-reducir-residuos-y-costos>
- [18] "México avanza hacia la sostenibilidad en aplicaciones de PVC | Plastics Technology Mexico". Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pt-mexico.com/articulos/mexico-avanza-hacia-la-sostenibilidad-en-aplicaciones-de-pvc>
- [19] "Resumen de Salud Pública: Cloruro de vinilo (Vinyl Chloride) | PHS | ATSDR". Consultado: el 24 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs20.html
- [20] J. P. Ojeda y I. T. Mercante, "Reciclaje De Residuos Plásticos Para La Producción De Agregados Livianos", *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 37, feb. 2021, Consultado: el 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/370/37072384011/html>
- [21] S. M. C. Sierra y J. A. A. Ver, "Valor compartido a través de la economía circular: reinventando la cadena de valor de la logística de plásticos en Colombia", *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, vol. 18, núm. 35, pp. 1-11, 2022.
- [22] R. SUMMA, "Costa Rica: Banco Nacional lanza primera tarjeta de plástico reciclado de la región", Revista Summa. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistasumma.com/costa-rica-banco-nacional-lanza-primera-tarjeta-de-plastico-reciclado-de-la-region/>
- [23] "Polyvinyl Chloride - an overview | ScienceDirect Topics". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www-sciencedirect-com.translate.goog/topics/materials-science/polyvinyl-chloride?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

- [24] M. Gilbert y S. Patrick, "Chapter 13 - Poly(Vinyl Chloride)", en *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)*, M. Gilbert, Ed., Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 329–388. doi: 10.1016/B978-0-323-35824-8.00013-X.
- [25] Plastico, "PVC (policloruro de vinilo): beneficios, usos y reciclaje", Plastico. Consultado: el 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.plastico.com/es/noticias/pvc-policloruro-de-vinilo-beneficios-usos-y-reciclaje>
- [26] "What is Lean? Lean Manufacturing & Lean Enterprise | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asq.org/quality-resources/lean?srsltid=AfmBOooFmN4Rma0qU4X77X1vjEkl2EtzPKZwCHiLrRd4AXD6aZF_N2tZ
- [27] "(PDF) Lean manufacturing y su aplicación en la industria de plástico". Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/392611071_Lean_manufacturing_y_su_aplicacion_en_la_industria_de_plastico
- [28] C. E. Zambrano Cancañón, Y. O. Lao León, M. R. Moreno Pino, C. E. Zambrano Cancañón, Y. O. Lao León, y M. R. Moreno Pino, "El pensamiento lean desde la manufactura hasta la salud: una revisión de la literatura", *Correo Científico Médico*, vol. 23, núm. 3, pp. 876–894, sep. 2019.
- [29] H. Felizzola Jiménez y C. Luna Amaya, "Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico", *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 22, núm. 2, pp. 263–277, abr. 2014, doi: 10.4067/S0718-33052014000200012.
- [30] "What is Brainstorming? Charette & Unstructured Procedures | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/brainstorming?srsltid=AfmBOopdITFna59zcoLqYp3IsAihKvtQKerPrf6-6N-gA8oSeTBmWHG>
- [31] "What is Multivoting? NGT Voting, Nominal Prioritization | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asq.org/quality-resources/multivoting?srsltid=AfmBOor6arzqRCm5Kv2oSS_pw1Wb-C1WcictPexKFpAmStf782m9qAEYn
- [32] "Impact Effort Matrix | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/impact-effort-matrix?srsltid=AfmBOooCdY03uWrMeAUj9C3x9GsKuXJr3-8XhLRVfU-6DWWtk-8rYTSq>
- [33] "¿Qué es un sistema MES? | IBM". Consultado: el 12 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/mx-es/topics/mes-system>
- [34] "What is a Fishbone Diagram? Ishikawa Cause & Effect Diagram | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/fishbone?srsltid=AfmBOoqqdQbQUaQ9AaowlewX1ZgK2n06VeQHAKtZiyKJxpFhzA98Ppn>
- [35] "Five Whys and Five Hows | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/five-whys?srsltid=AfmBOoob6faREbTACZrsamziwo5fgW4VO8LDdoo1sKiMISWvLGr5wuxj>
- [36] "PDCA Cycle - What is the Plan-Do-Check-Act Cycle? | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://asq.org/quality-resources/pdca-cycle?srsltid=AfmBOor7M3sxo0P7AUh-ndpq6HltMvbs-raJaADIgliwqknxDk1KVmkr_
- [37] "The ABC basics of the WBS Paul Burek." Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pmi.org/learning/library/work-breakdown-structure-basics-5919>
- [38] "ProjectManagement.com - RACI". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.projectmanagement.com/wikis/234008/raci#_
- [39] "Gantt Charts and Agile Planning". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pmi.org/disciplined-agile/agile/agilegantt>
- [40] "Stakeholder management". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pmi.org/learning/library/stakeholder-management-task-project-success-7736>
- [41] "What is FMEA? Failure Mode & Effects Analysis | ASQ". Consultado: el 19 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asq.org/quality-resources/fmea?srsltid=AfmBOoqL04GpFG0Qnaej7aanTGsbFnHTF0RXXBmYjIANppeqsQmm9idJ>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para traducir partes de este artículo del inglés al español. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Estudio computacional del comportamiento de un calentador de agua con una resistencia tipo C

Computational study of the behavior of a water heater with a type C resistance

Carlos A. Jiménez-Carballo¹

Fecha de recepción: 3 de diciembre, 2024

Fecha de aprobación: 4 de abril, 2025

Jiménez-Carballo, C.A. Estudio computacional del comportamiento de un calentador de agua con una resistencia tipo c. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 157-169.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7649>



Palabras clave

Calentador de agua; dinámica de fluidos computacional; modelo de turbulencia k- ϵ ; transferencia de calor en fluidos; método de elemento finito.

Resumen

El propósito principal de este trabajo es estudiar computacionalmente el comportamiento fluídico y térmico del agua en un calentador de agua con una resistencia tipo C. Para esto, se desarrolló una simulación numérica multifísica basada en la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), donde se utiliza el Método de Elementos Finitos (FEM) y para la cual se acoplaron el modelo de flujo turbulento k- ϵ y las ecuaciones de conservación de la energía térmica y la ley de Fourier de la transferencia de calor. Como consecuencia de las simulaciones realizadas, se obtuvieron los perfiles de velocidades y vorticidad del flujo, la caída de presiones en la entrada y la salida del calentador, así como las temperaturas máximas alcanzadas en la salida del calentador para diferentes combinaciones de potencia de calor y caudales. Finalmente, se determinaron cuáles son las combinaciones de potencia y caudal que permiten que un usuario del calentador no sufra lesiones en la piel debido a la temperatura de salida del agua.

Keywords

Water heater; computational fluid dynamics; k- ϵ turbulence model; heat transfer in fluids; finite element method.

Abstract

The main purpose of this work is to computationally study the fluidic and thermal behavior of water in a water heater with a type C resistance. For this, a multiphysics numerical simulation based on Computational Fluid Dynamics (CFD) was developed, where the Finite Element Method (FEM) is used, and the k- ϵ turbulent flow model and the equations of thermal energy conservation and Fourier's law of heat transfer were coupled. As a result of the simulations carried out, the velocity and vorticity profiles of the flow, the pressure drop at the inlet and outlet of the heater, as well as the maximum temperatures reached at the outlet of the heater for different combinations of heat power and flow rates were obtained. Finally, the combinations of power and flow rates that prevent a user of the heater from suffering skin injuries due to the outlet water temperature were determined.

Introducción

Los calentadores de agua proveen agua caliente para distintos usos en residencias, empresas y otros establecimientos, desde la higiene personal hasta actividades industriales. Son elementos fundamentales. En el mercado hay diferentes tipos de sistemas de calentamiento de agua: eléctricos, de gas, solares e híbridos, cada uno con características y beneficios específicos [1].

Los calentadores de agua domésticos tienen niveles de potencia diferentes. Los modelos eléctricos oscilan entre 1.5 kW y 5 kW. En cambio, los calentadores a gas varían más, con rangos comunes entre 7 kW y 30 kW, según su tipo y tamaño. La potencia apropiada depende del caudal de agua y la velocidad para alcanzar la temperatura deseada. Por ejemplo, en el Cuadro 1 se muestra la temperatura máxima (T) alcanzada por el agua a diferentes caudales (C) y potencias (P) [2].

Cuadro 1. Temperatura máxima alcanzada por el agua para distintas potencias y caudales [2].

P (kW)	C (l/min)								T (°C)
	1.2	1.6	1.8	2.0	2.6	3.2	4.0	4.3	
1.8	22								
2.4		22	19	17	13				
3.0		27	24	22	17				
3.5		31	28	25	19				
5.7						26	20	19	

La seguridad térmica es fundamental al usar calentadores de agua. La temperatura elevada del agua puede ser peligrosa para la piel humana. La exposición al agua a una temperatura de 60 °C puede provocar quemaduras de tercer grado en un lapso de aproximadamente cinco segundos, según investigaciones y directrices de seguridad. Es posible que se produzca daño en un lapso inferior a un segundo a temperaturas elevadas, como 70 °C. El tiempo recomendado para permanecer en el agua de acuerdo con la temperatura del agua se muestra en el Cuadro 2. Los calentadores de agua deben tener termostatos y dispositivos de control para limitar la temperatura del agua, lo cual asegura un uso seguro del equipo y previene posibles quemaduras [3].

Cuadro 2. Relación tiempo/temperatura para quemaduras [3].

Temperatura (°C)	Tiempo para producir una quemadura seria
49	Más de 5 min
51	Entre 1.5 min y 2 min
54	Cerca de 30 s
57	Cerca de 10 s
60	Menos de 10 s
63	Menos de 5 s
66	Cerca de 1.5 s
68	Cerca de 1 s

Algunos de los calentadores domésticos de agua utilizan una resistencia tipo C, el cual es un elemento calefactor cuyo diseño maximiza el contacto con el agua, lo que permite una transferencia de calor más eficiente. Las resistencias de tipo C se distinguen por su durabilidad y la facilidad de limpieza, aunque su reemplazo puede ser algo complicado dependiendo del modelo del calentador.

Investigaciones previas han demostrado que la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD²) y el Método de Elementos Finitos (FEM³) permiten analizar el comportamiento fluídico y la distribución de temperaturas en calentadores de agua [4]. Por ejemplo, en [5] utilizaron CFD y FEM para determinar coeficientes de transferencia de calor en calentadores de flujo continuo, aunque sin considerar configuraciones de resistencia no lineales. Por otro lado, Paul y Masukume en [6] utilizaron CFD para simular la eficiencia de calentadores solares, encontrando que la configuración del tubo y las condiciones de flujo son determinantes para la eficiencia térmica. Recientemente, en [7] analizaron el rendimiento para los calentadores de

2 Por sus siglas del inglés Computational Fluid Dynamics.

3 Por sus siglas del inglés Finite Element Method.

agua a gas para cuatro geometrías diferentes utilizando CFD, donde los resultados mostraron que las geometrías en espiral aumentan significativamente el número de Nusselt al crear flujos secundarios con una caída de presión mucho menor.

El objetivo principal de trabajo es analizar el comportamiento térmico y fluido del agua en un calentador convencional que posee una resistencia en forma de C, esto con ayuda de FEM. Específicamente, se construirá una simulación numérica multifísica de la interacción fluido-térmica del agua en el calentador utilizando la CFD basada en FEM, en la cual se utiliza el modelo de flujos turbulentos $k-\epsilon$, de números de Reynolds bajos y el modelo de transferencia de calor en fluidos. A partir de dicho modelo se estudiará el comportamiento del flujo del agua del calentador, así como las temperaturas máximas que alcanza el agua en la salida del calentador. Finalmente, se establecerán las combinaciones de potencia y caudal para que, al usar el calentador, este no llegue a generar daños en la piel de las personas.

Metodología

En la Figura 1 se muestra la propuesta del diseño de una resistencia tipo C del calentador de agua convencional, el cual está hecho de cobre. Sus dimensiones se muestran en el Cuadro 3. En la Figura 2 se presenta una vista superior del calentador donde se puede observar el diámetro de la entrada y salida del agua, así como sus posiciones con respecto a la resistencia y al centro de la carcasa. En la Figura 3 se puede ver una vista frontal de la resistencia tipo C del calentador, así como de la carcasa.

Cuadro 3. Dimensiones de la propuesta de la resistencia del calentador de agua.

Parámetro	Valor en mm
Diámetro de los tubos de entrada y salida de agua	12.62
Diámetro de la resistencia del calentador	8.0
Diámetro del calentador	50.0
Altura de la resistencia del calentador	152
Altura del calentador	160

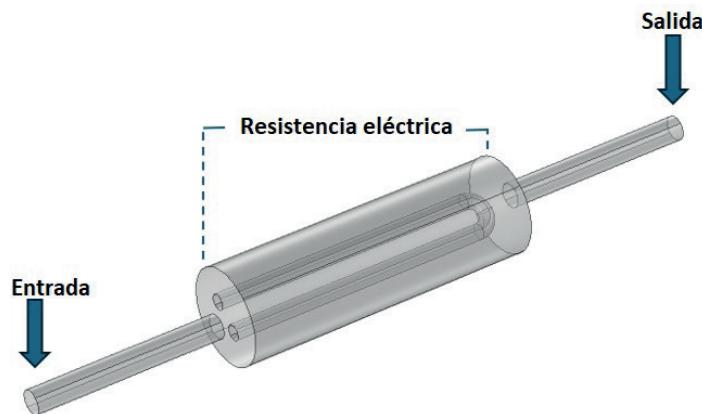


Figura 1. Propuesta de resistencia de un calentador de agua doméstico.

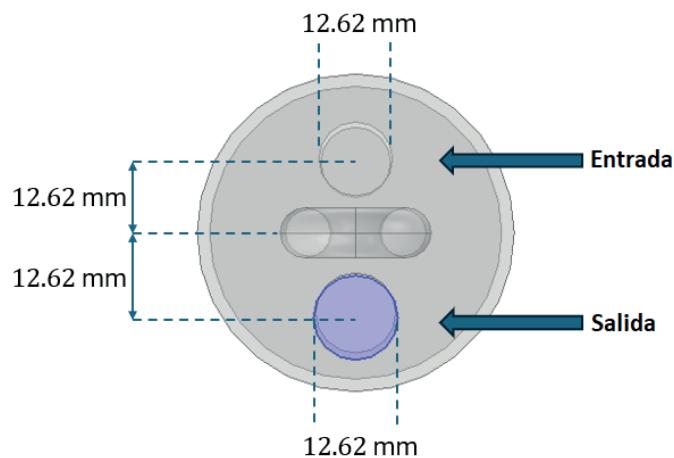


Figura 2. Vista superior de la resistencia del calentador de agua doméstico.

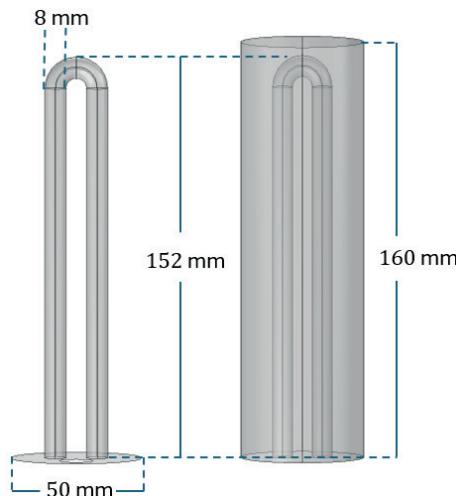


Figura 3. Vista frontal de la resistencia del calentador de agua doméstico.

Instrucciones de modelado y simulación

Para el desarrollo del modelo computacional para analizar el comportamiento fluídico y térmico del agua en el calentador se consideró que la misma es un fluido continuo, incompresible, isotrópico y newtoniano. Además, el efecto de la gravedad es despreciable y se ignora el calentamiento por radiación térmica. Para analizar dicho comportamiento se realizó una simulación multífísica en el programa COMSOL Multiphysics®, versión 6.2 la cual involucra a las interfaces física “Flujo Turbulento k- ϵ , Re bajos” y “Transferencia de calor en fluidos”. La primera se utiliza para analizar el movimiento del fluido con el objetivo de obtener los campos de velocidades, presiones y vorticidad para flujos turbulentos con números de Reynolds bajos⁴; mientras que la segunda se realizó con el propósito de determinar la distribución de temperaturas.

4 Para este estudio se define a los flujos turbulentos con números bajos de Reynolds a aquellos donde este último esté entre 2000 y 10000.

La interfaz física “Flujo Turbulento k-ε, Re bajos” del software Comsol Multiphysics, se utiliza para simular flujos de fase única a altos números de Reynolds. La interfaz física es adecuada para flujos incompresibles y flujo compresible a números de Mach⁵ bajos [8]. Esta interfaz física resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes [9]:

$$\text{Conservación del momento} \Rightarrow \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla(p\mathbf{I} + \mathbf{K}) + \vec{F}, \quad (1)$$

$$\text{Conservación de la masa} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (2)$$

donde ρ , p , μ y \vec{v} son la densidad, la presión, la viscosidad y la velocidad del fluido, respectivamente, \vec{F} son las fuerzas externas (como la fuerza de gravedad fuerza electromagnética, etc) y \mathbf{K} es el tensor de esfuerzos viscosos y se determina:

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_T)(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T), \quad (3)$$

en el que μ_T es la viscosidad turbulenta que se define como [10]:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu(\rho, \mu, k, \varepsilon, l_w) \quad (4)$$

El comportamiento turbulento del flujo se modela con dos ecuaciones de transporte adicionales [11]:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} f_\varepsilon(\rho, \mu, k, \varepsilon, l_w) \quad (6)$$

donde la ecuación (5) describe la evolución de la energía cinética turbulenta (k) y la ecuación (6) representa la ecuación de transporte de la tasa de disipación de energía (ε). En las ecuaciones (4), (5) y (6) las C_μ , $C_{\varepsilon 1}$ y $C_{\varepsilon 2}$ son constantes empíricas, σ_k y σ_ε son los coeficientes de difusión para k y ε , P_k es el término de producción de k , el cual se determina como:

$$P_k = \mu_T [\nabla \vec{v} \cdot (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)] \quad (7)$$

Además, en las ecuaciones (4) y (6), los términos f_μ y f_ε se conocen factores de corrección los cual dependen de las propiedades del flujo y la distancia de la pared. Por otro lado, los valores típicos que utiliza el modelo para las constantes empíricas son $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$ y $\sigma_\varepsilon = 1.3$ [12].

Para mejorar la precisión del comportamiento del flujo cerca de las paredes sólidas se utilizan las ecuaciones de correcciones de pared, las cual son:

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4 \quad (8)$$

5 El número de Mach (Ma) se define como la comparación entre la rapidez del fluido v y la rapidez del sonido en dicho fluido v_s , esto es $Ma \equiv \frac{v}{v_s}$ [8].

$$l_w = \frac{1}{G} - \frac{l_{ref}}{2} \quad (9)$$

donde l_w es la longitud característica de la capa límite turbulenta cerca de la pared, l_{ref} es una longitud de referencia asociada al problema y G es el factor de gradiente relacionado con las propiedades del flujo.

La interfaz física “Transferencia de calor en fluidos” la cual se utiliza para modelar la transferencia de calor en fluidos por conducción, convección y radiación [13]. Dicha interfaz resuelve las ecuaciones de conservación de energía térmica y ley de Fourier [14]:

$$\rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (10)$$

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (11)$$

donde c_p es el calor específico, \vec{v} es la velocidad la cual es gobernada por las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes, \vec{q} es el flujo de calor y T es la temperatura. En la ecuación (10), el término $\rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T$ describe la energía térmica que es arrastrada por el movimiento del fluido, es decir, el transporte de calor por convección. El segundo término, $\nabla \cdot \vec{q}$, representa el flujo de calor por conducción dentro del sistema, que ocurre debido a diferencias de temperatura. Por otro lado, Q representa una fuente térmica genérica, Q_p corresponde al calor generado por disipación viscosa, y Q_{vd} incluye otras posibles contribuciones específicas del problema.

Para construir la simulación, se escoge la opción 3D en dimensión de espacio. Se seleccionan las interfaces mencionadas y el tipo de estudio deseado. Se construye la geometría utilizando los datos del Cuadro 3. Se establece “Water,liquid⁶” como el fluido de trabajo y “Copper⁷” para la resistencia. Posteriormente se definen las condiciones físicas del flujo turbulento $k-\epsilon$ para números de Reynolds (Re) bajos, donde para este trabajo se consideró el intervalo $2000 \leq Re \leq 10000$, por lo que primero se verificó si bajo los parámetros físicos de entrada (velocidad), el agua, cumple con dicho criterio. Seguidamente, se establecen como valores iniciales los valores iniciales de la energía cinética turbulenta (k_0) y la tasa de disipación (ϵ_0) para cada velocidad de entrada (v), las cuales se determinan con las expresiones [5]:

$$k_0 = \frac{3}{2} (Iv_0)^2 \quad (12)$$

$$\epsilon_0 = C_\mu^{3/4} \frac{k_0^{3/2}}{L} \quad (13)$$

donde I es la intensidad de turbulencia la cual, para un flujo turbulento, en una tubería se aproxima a 0.05, L es la longitud de escala turbulenta, que para un flujo interno se estima como $L = 0.07D$, donde D es el diámetro de la tubería. Adicionalmente, se establece el reciproco de la distancia de pared inicial G_0 . En la entrada del agua se asigna la velocidad del fluido (v) a partir de los valores indicados en el Cuadro 4. En la salida se define la presión igual a cero.

6 Según los materiales de Comsol Multiphysics, el agua se encuentra en la sección Built In [15].

7 En la lista de materiales de Comsol Multiphysics, el cobre se encuentra en la sección Built In [15].

En relación con la interfaz física transferencia de calor en fluidos, primero asigna una temperatura inicial del agua de 20 °C. En la entrada se incluye un flujo de entrada con temperatura la misma temperatura y en el contorno de salida se define un flujo de salida. La resistencia tipo C se configura como fuente de calor a la cual se le asocia una tasa de calor P en Watts y los contornos externos se configuran como contornos abiertos.

Para acoplar a las interfaces “Flujo turbulento k- ϵ , Re bajos” y “Transferencia de calor en fluidos” se utiliza el acople multifísico “flujo no isotérmico”. En cuanto al mallado, se utiliza una discretización de aristas en la región correspondiente a la resistencia, mientras que para las demás áreas se selecciona un mallado libre triangular. Posteriormente, se establece un barrido paramétrico respecto al parámetro de velocidad inicial, conforme a las velocidades indicadas en el Cuadro 4, y se lleva a cabo el estudio correspondiente.

Resultados

En esta sección se exponen los resultados más importantes de estudio del comportamiento del fluídico y térmico del agua en el calentador con la resistencia tipo C.

Comportamiento del flujo del agua

Para este caso, el fluido que se analizó tiene velocidades de entrada entre 0.16 m/s ($C = 1.2$ l/min) y 0.57 m/s ($C = 4.3$ l/min). En el Cuadro 4 se muestra el número de Reynolds (Re) y el número de Mach (Ma) para dichas velocidades, donde se tiene que los valores del Re del flujo en la entrada del calentador se encuentran entre 2000 y 10000, lo que implica que el flujo cumple con las condiciones deseadas para este trabajo, o sea en la entrada el agua se comporta como un flujo turbulento con bajo número de Reynolds. Por otro lado, los valores de Ma , señalan que el flujo está significativamente por debajo de la velocidad del sonido, lo que confirma que se trata de un flujo subsónico y no compresible.

Cuadro 4. Caudales, velocidades de entrada, número de Reynolds y número de Mach del agua en estudio.

C (l/min)	1.2	1.6	1.8	2.0	2.7	3.2	4.0	4.3
V (m/s)	0.16	0.21	0.24	0.27	0.35	0.43	0.53	0.57
Re	2019	2650	3029	3407	4417	5426	6689	7193
Ma ($\times 10^{-6}$)	107	140	160	180	233	287	353	380

En la Figura 4 se presentan los perfiles de velocidad del agua en el calentador para algunas de las velocidades de entrada mostradas en el Cuadro 4, desde 0.16 m/s a 0.57 m/s. Para el caso de velocidades bajas, el flujo se vuelve más homogéneo y con gradientes de velocidad más bajos, pero, a medida que la velocidad de entrada aumenta, las velocidades máximas dentro del calentador también aumentan, concentrándose en el centro del canal. Al mismo tiempo, los cambios de velocidad se vuelven más marcados cerca de las paredes y la salida. A altas velocidades, el flujo se vuelve más dinámico y heterogéneo, con una mayor energía cinética y una interacción más intensa con las superficies del calentador. Asimismo, se puede ver que dentro del cilindro del calentador el agua del fluido se reduce en comparación con la velocidad de entrada, lo cual facilita que el agua se caliente de mejor manera.

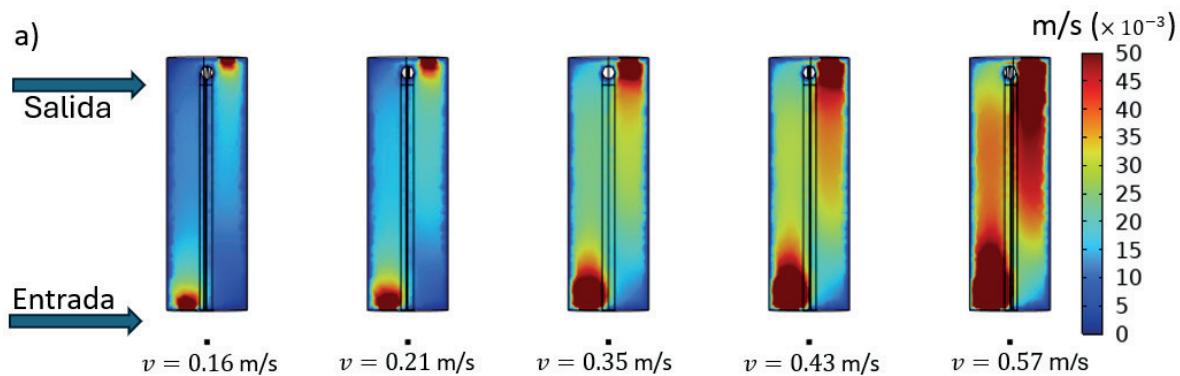


Figura 4. Perfiles de velocidad del fluido en el calentador para algunas de las velocidades de entrada del agua presentadas en el Cuadro 4.

En la Figura 5 se muestra la circulación del agua en el calentador para una velocidad de entrada de 0.57 m/s, en donde se puede apreciar que el flujo del agua desacelera al entrar al calentador, pero además las líneas de flujo siguen una trayectoria prácticamente directa hacia la salida y no se muestran remolinos ni turbulencia elevada, lo que significa que para las velocidades de entrada analizadas en este trabajo en el calentador no se van a presentar vibraciones importantes.



Figura 5. Circulación del agua en el calentador, considerando que la velocidad de entrada del agua es de $v = 0.57 \text{ m/s}$.

En la Figura 6 se observa la caída de presión, la cual aumenta de forma no lineal con la velocidad de entrada del agua. A velocidades de entrada bajas, la caída de presión es mínima debido a que el flujo de entrada se encuentra en el régimen transitorio laminar-turbulento y además de que hay bajas pérdidas por fricción. A medida que la velocidad se incrementa, la disminución de presión aumenta de manera acelerada a causa de gradientes de velocidad más altos y fricción incrementada. Cuando la velocidad es elevada, el aumento se vuelve más notable, lo que sugiere una potencial evolución hacia un flujo turbulento, lo cual destaca la importancia de controlar la velocidad para optimizar la eficiencia del sistema.

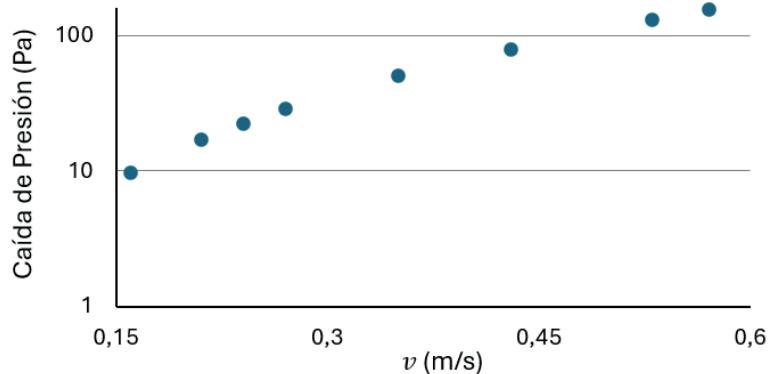


Figura 6: Caída de presión en función de la velocidad de entrada v .

En la Figura 7 se pueden ver los perfiles de vorticidad del agua en el calentador para algunas de las velocidades de entrada mostradas en el Cuadro 4, donde se aprecia que en general los valores más altos de vorticidad se presentan en las paredes del calentador y en el centro de la resistencia, lo cual implica que existe una mayor interacción entre el fluido y la estructura en dichos lugares, así como gradientes de velocidad más marcados. Para el caso de velocidades de entrada bajas ($v = 0.16 \text{ m/s}$ y $v = 0.21 \text{ m/s}$) la vorticidad es mínima lo cual indica la presencia de un flujo laminar y más estable, lo cual es de esperar, pues de acuerdo con el Cuadro 4, esos casos se encuentran dentro de la zona de transición de flujo laminar-turbulento. A medida que la velocidad de entrada aumenta, las áreas de alta vorticidad también aumentan, especialmente en las partes de entrada, de salida y paredes, lo que implica que, a altas velocidades, el flujo presenta una mayor inestabilidad y puede transitar hacia la turbulencia.

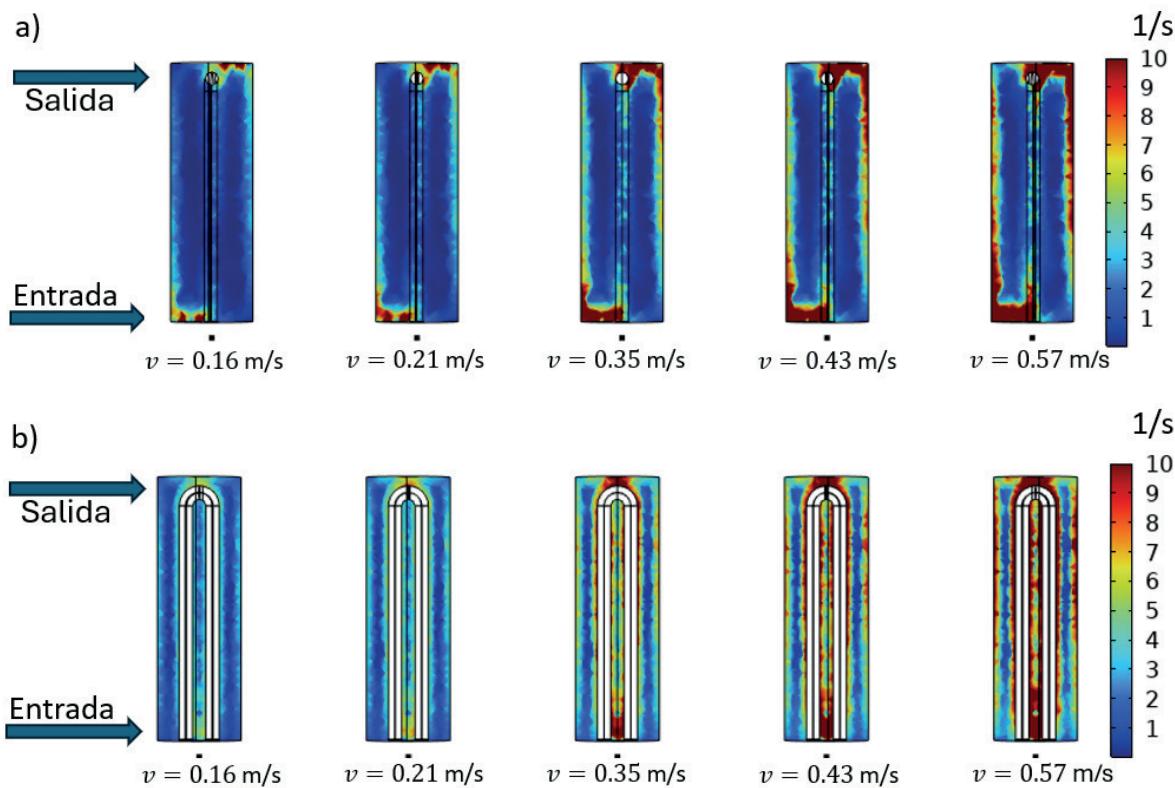


Figura 7. Perfiles de vorticidad del agua en el calentador para diferentes velocidades de entrada del agua a) vista plano yz b) vista plano xz .

Perfiles de temperatura

Para este caso, se analizó el aumento de la temperatura del agua en el calentador con la resistencia tipo C, donde se consideró que la potencia en dicha resistencia está entre 1800 W y 5700 W, además el caudal de agua en el calentador está entre 1.2 l/min y 4.3 l/min. En el Cuadro 5 se presenta la temperatura máxima T con la que sale el agua del calentador, para diferentes combinaciones de potencia eléctrica (P) y caudal (C). Para valores mayores de P se obtienen valores más altos de T para un mismo valor de C , por ejemplo, para $C = 1.2$ l/min, T se incrementa desde 42.6 °C con $P = 1.8$ kW hasta 91.4 °C con $P = 5.7$ kW. Esto es lo esperado dado que una mayor transferencia de energía térmica permite calentar el agua de mejor manera. Además, del Cuadro 5 se tiene que para valores más altos de C , T disminuye para un mismo valor de P , lo cual sucede debido a que el agua se mueve más rápido, lo que reduce el tiempo de esta en contacto con la resistencia del calentador y, por ende, la energía absorbida. Por ejemplo, con $P = 2.4$ kW, T cae de 50.2 °C a 28.4 °C al aumentar C de 1.2 l/min a 4.3 l/min.

Cuadro 5: Temperatura máxima alcanzada por el agua para distintas potencias y caudales en el calentador con resistencia tipo C.

P (kW)	C (l/min)								T (°C)
	1.2	1.6	1.8	2.0	2.6	3.2	4.0	4.3	
1.8	42.6	37.2	35.1	33.4	30.3	28.4	26.8	26.3	
2.4	50.2	43.0	40.1	37.8	33.7	31.2	29.1	28.4	
3.0	57.7	48.7	45.1	42.3	37.2	34.0	31.3	30.6	
3.5	64.0	53.5	49.3	46.0	40.0	36.3	33.2	32.3	
5.7	91.4	74.5	67.6	62.3	52.6	46.6	41.6	40.1	

Si se analizan las temperaturas máximas alcanzadas por el agua en términos del tiempo recomendado para permanecer en el agua (Cuadro 2), las temperaturas en color rojo del Cuadro 5 representan aquellas combinaciones de P y C que no son recomendables utilizar en el calentador propuesto, esto debido a que puede provocar lesiones serias en la piel. Las temperaturas en amarillo y anaranjado corresponden a aquellas donde las personas pueden permanecer bajo el agua por un tiempo entre 10 s y 2 min. Finalmente, las combinaciones de C y P que generan temperaturas máximas de color verde, son aquellas en las que las personas corren menos riesgo de sufrir una quemadura.

Conclusiones

A partir de este trabajo se desarrolló un análisis multifísico del comportamiento del agua en una propuesta de un calentador doméstico con una resistencia tipo C, esto con ayuda del Método de Elementos Finitos, el cual facilitó una comprensión detallada del comportamiento térmico y del flujo del agua [5]. Primero, se aplicó un modelo del flujo turbulento k - ϵ para números de Reynolds bajo para estudiar el flujo del agua, esto debido a que el flujo de entrada del agua al calentador tenía números de Reynolds entre 2000 y 10000. A través de la simulación numérica se obtuvieron los perfiles de velocidad y vorticidad, así como la caída de presiones del agua entre la entrada y salida del agua en el calentador, con lo cual determinó que para las velocidades de entrada de 0.16 m/s, 0.21 m/s y 0.24 m/s, el agua dentro del calentador se comportó de forma laminar, esto debido a valores bajos de vorticidad y velocidades. Para el resto de las velocidades de entrada aplicadas se encontró que el flujo si se comporta como un flujo turbulento.

Con ayuda del modelo de transferencia de calor de fluidos utilizado se encontraron las temperaturas máximas que alcanza el agua al salir del calentador, esto para diferentes combinaciones de potencia en la resistencia y caudales de agua. Se encontró que a mayores caudales, para una misma potencia, la temperatura de salida es menor, mientras que, para mayores potencias de calor en la resistencia para un mismo caudal, mayor es dicha temperatura. Se determinaron las combinaciones de caudal y potencia de calor que pueden ser seguras, así como las peligrosas para la piel con lo que se concluye que es esencial alcanzar un equilibrio adecuado para prevenir sobrecalentamientos que podrían representar riesgos para los usuarios. Gracias a este estudio, se logró asegurar que las temperaturas del agua se mantuvieran dentro de límites seguros para evitar posibles daños en la piel, resaltando la relevancia de emplear modelos matemáticos en la creación de dispositivos seguros y efectivos.

Agradecimientos

Se agradece a la Escuela de Física del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Wattco, "Elementos de Calefacción Industrial," 2024. [Online]. Available: <https://www.wattco.com/es>
- [2] Aquapower, "Temperature; Technical Drawings - AquaPower AQM 2-1 Operation And Installation," 2024. [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/1213569/Aquapower-Aqm-2-1.html>
- [3] Manuals+, "Manual del usuario del calentador de agua eléctrico Rheem," 2024. [Online]. Available: <https://es.manuals.plus/rheem/rheem-electric-water-heater-manual-pdf>
- [4] S. F. Ahmed *et al.*, "Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 25, 2021, Art. no. 100981. doi: 10.1016/j.tsep.2021.100981.
- [5] V. E. Márquez-Baños, J. J. Valencia-López, O. García-Aranda, and C. Heard, "Determinación computacional del coeficiente de transferencia de calor en calentadores eléctricos de flujo continuo, mediante dinámica de fluidos computacional," *Información Tecnológica*, vol. 27, no. 5, pp. 151–162, 2016, doi: 10.4067/S0718-07642016000500017.
- [6] Z. Paul and P.-M. Masukume, "Efficiency optimization in solar water heaters: A comparative CFD study of design configurations," *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, vol. 2, no. 4, 2023, doi: 10.56578/peet020405.
- [7] A. Parsaei and K. Goudarzi, "Numerical investigation of the performance improvement of instantaneous gas water heater by introducing new geometries for the heat exchanger," *Journal of Building Engineering*, vol. 89, 2024, Art. no. 109275, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobr.2024.109275>.
- [8] COMSOL, *Introduction to the CFD Module*, COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.cfd/IntroductionToCFDModule.pdf>
- [9] J. Claycomb, *Mathematical methods for physics: using maple & matlab*, 1st ed. Dulles, VA, USA: Mercury Learning & Information, 2018.
- [10] S. P. Suresha, G. J. Reddy, and H. Basha, "Turbulent low-Reynolds-number k-ε model effect on buoyancy-driven free convection flow past a vertical cylinder," *Indian Journal of Physics*, vol. 98, no. 2, pp. 659–677, Feb. 2024, doi: 10.1007/s12648-023-02797-7.
- [11] D. O. A. Cruz and F. T. Pinho, "Turbulent pipe flow predictions with a low Reynolds number k-ε model for drag reducing fluids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 114, no. 2–3, pp. 109–148, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0377-0257(03)00119-8.
- [12] M. T. Schobeiri, *Fluid mechanics for engineers: A graduate textbook*. Berlin, Germany: Springer, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-11594-3.
- [13] COMSOL, *Heat Transfer Module User's Guide*, COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>
- [14] Z. Chai and T. S. Zhao, "Lattice Boltzmann model for the convection-diffusion equation," *Physical Review E*, vol. 87, no. 6, Jun. 2013, Art. no. 063309, doi: 10.1103/PhysRevE.87.063309.

[15] COMSOL, *Material Library User's Guide*, COMSOL Inc., 2023. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/6.2/doc/com.comsol.help.matlib/MaterialLibraryUsersGuide.pdf>

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.

Estrategias de manejo del riego y la nutrición en tomate hidropónico bajo invernadero: efecto en el rendimiento y la eficiencia hídrica

Irrigation and nutrition management strategies in greenhouse hydroponic tomato: effect on yield and water efficiency

Freddy Soto-Bravo¹

Fecha de recepción: 5 de diciembre, 2024

Fecha de aprobación: 16 de abril, 2025

Soto-Bravo, F. Estrategias de manejo del riego y la nutrición en tomate hidropónico bajo invernadero: efecto en el rendimiento y la eficiencia hídrica . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 170-181.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7652>

¹ Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 freddy.sotobravo@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>



Palabras clave

Eficiencia de uso de agua; fertiriego; balance hídrico; riego por demanda.

Resumen

En la agricultura actual, es urgente realizar un uso eficiente del agua y los fertilizantes, ante el desafío de abastecer la creciente demanda global de alimentos debido al acelerado crecimiento demográfico y la potencial crisis global del agua agravada por el cambio climático. En este sentido, se realizó un estudio en el cultivo de tomate hidropónico en invernadero, que incluyó seis tratamientos en un diseño bifactorial que combinaba tres niveles de nutrición (baja, media y alta) con dos estrategias de riego (riegos de menor volumen y mayor frecuencia; riegos de mayor volumen y menor frecuencia). Se evaluó volúmenes de riego y drenaje, evapotranspiración del cultivo (ET_c), conductividad eléctrica del drenaje (CE), humedad volumétrica en el sustrato (θ), peso seco (PS), área foliar (AF), el rendimiento de frutos total, comercial de distintas calidades y desecho y eficiencia de uso de agua (EUA). No hubo efecto de la interacción entre el nivel de nutrición y estrategia de riego para ninguna de las variables. Los tratamientos con nutrición media lograron la mayor EUA, asociada a una mayor producción de frutos comerciales de primera calidad, menor desecho y una menor ET_c en comparación con nutrición alta. En contraste, los tratamientos con alta concentración de nutrientes incrementaron la demanda hídrica y la CE del sustrato, lo que afectó negativamente el rendimiento y la EUA. La combinación de nutrición media con riego ajustado a la demanda del cultivo favoreció un mejor entorno radicular de humedad y salinidad, lo que la vez benefició un crecimiento vegetativo/productivo más equilibrado, que se reflejó en mayor rendimiento y calidad de fruto, y en EUA.

Keywords

Water use efficiency; fertirrigation; water balance; irrigation on demand.

Abstract

In modern agriculture, efficient use of water and fertilizers is imperative to meet the growing global demand for food driven by rapid population growth and the potential global water crisis exacerbated by climate change. This study was conducted on hydroponic tomato cultivation in a greenhouse, including six treatments that combined three levels of nutrition (low, medium, and high) and two irrigation strategies (lower volume with higher frequency and higher volume with lower frequency). Irrigation and drainage volumes, crop evapotranspiration (ET_c), drainage electrical conductivity (CE), volumetric humidity in the substrate (θ), dry weight (PS), leaf area (AF), total fruit yield, commercial yield of different qualities and waste, and water use efficiency (WUE) were evaluated. There was no effect of the interaction between the level of nutrition and irrigation strategy for any of the variables. Treatments with optimal nutrition achieved the highest WUE, associated with a higher production of commercial first-quality fruits, less waste, and a reduced ET_c compared to high nutrition. In contrast, treatments with high nutrient concentrations increased water demand and substrate EC, negatively affecting yield and WUE. The combination of medium nutrition with irrigation adjusted to crop demand favored a better root environment of humidity and salinity, which in turn benefited a more balanced vegetative/productive growth, which was reflected in higher yield and fruit quality, and in the USA.

Introducción

El manejo integrado del riego y la nutrición en sistemas hidropónicos bajo invernadero es esencial para lograr un equilibrio adecuado entre el crecimiento vegetativo y reproductivo del cultivo, lo cual se traduce en un mayor rendimiento y mejor calidad de los frutos [1]. Dicho balance es crítico en cultivos de alta demanda nutricional como el tomate (*Solanum lycopersicum*), una de las hortalizas de mayor producción y consumo a nivel mundial. Para esto, es fundamental la precisión en las aplicaciones de agua y nutrientes, según los requerimientos y las condiciones climáticas específicas del cultivo, especialmente ante el desafío de satisfacer la demanda global de productos agrícolas de alta calidad [2].

La producción de tomate hidropónico en invernaderos enfrenta desafíos significativos en la optimización del uso del agua y de los fertilizantes, elementos críticos para aumentar la productividad y sostenibilidad del cultivo. A pesar de los avances tecnológicos en fertiriego, persisten vacíos de conocimiento sobre la interacción entre las estrategias de manejo del riego y diferentes niveles de nutrición, aspecto fundamental para comprender y mejorar la eficiencia del uso de recursos hídricos y minerales [3]. Un manejo inadecuado del ferti-riego puede conducir al uso ineficiente de estos recursos, impactando negativamente la productividad y elevando el impacto ambiental, especialmente en sistemas cerrados como los cultivos hidropónicos [4].

El sustrato de fibra de coco, comúnmente utilizado en tomate hidropónico, presenta desafíos específicos relacionados con la salinidad y la retención de humedad, ya que pueden influir en la absorción de nutrientes y en el rendimiento del cultivo. La falta de estudios que aborden integralmente estas interacciones recalca la necesidad de desarrollar y validar prácticas de manejo del riego y la nutrición que sean sostenibles y eficientes [5]. En este sentido, diversos estudios han subrayado que un ajuste preciso del riego y la fertilización puede mejorar significativamente las eficiencias de uso de agua y de fertilizantes, así como el rendimiento y la calidad de los frutos [6]. La importancia de este estudio radica en la necesidad de desarrollar estrategias de fertiriego que optimicen el rendimiento y minimicen el impacto ambiental, contribuyendo así a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del incremento en la concentración de nutrientes en función de dos estrategias de manejo del riego, sobre variables de manejo del ferti-riego, eficiencia hídrica y el rendimiento en el cultivo de tomate hidropónico en fibra de coco bajo invernadero.

Materiales y métodos

La investigación tuvo lugar de junio a noviembre de 2018 en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno en San José de Alajuela, Costa Rica ($10^{\circ} 01' N$, $84^{\circ} 16' O$, 840 msnm), con promedios anuales de $22^{\circ}C$ de temperatura, 78% de humedad relativa y 1940 mm de precipitación. Se cultivó en un invernadero multitúnel hecho de hierro galvanizado con polietileno transparente de 200 μm y malla anti-insectos de 43 mesh en las paredes. La ventilación fue pasiva a través de paredes laterales y ventanas cenitales automatizadas, las cuales eran gestionadas por sensores de velocidad del viento y de lluvia.

Durante el experimento, se registró la radiación solar total (Piranómetro LI-COR Mod. LI-200SA), la temperatura y la humedad relativa (VAISALA Modelo HMP-35C). La integral de radiación solar diaria varió de 12,67 a 47,8 $MJ m^{-2} d^{-1}$, con una media de 29,1 $MJ m^{-2} d^{-1}$. Los promedios globales de máximas, mínimas y promedios, en el mismo orden, fueron 37,5, 16,4 y 25,1 $^{\circ}C$ para temperatura y de 100%, 28,9% y 72,7% para humedad relativa.

Se utilizó un sistema de cultivo hidropónico en tablas de fibra de coco (28,8 L), cuyas características físicas se determinaron según metodología UNE-EN-13041-2007 [7]. Dicho sustrato presentó una capacidad de retención de humedad de 61% a capacidad de contenedor (CC) y de 32 % en punto de marchitez permanente (PMP) para un agua total disponible del 28% y una capacidad de aireación del 29 %.

Se utilizó el híbrido de tomate Gladiador con hábito de crecimiento indeterminado, altos rendimientos de frutos de buen tamaño, larga vida poscosecha, y resistencia a *Verticillium sp*, *Fusarium* raza 1 y 2 y al virus TYLCV. El trasplante se realizó a los 35 días después de la siembra, cuando las plántulas tenían entre 5 - 6 hojas verdaderas, colocando tres plantas por tabla de fibra de coco con distancias de 0,33 m entre plantas y 1,5 m entre hileras (2 plantas m⁻²).

Se evaluaron seis tratamientos que combinaron dos estrategias de manejo del riego: E₁) menor volumen y mayor frecuencia y E₂) mayor volumen y menor frecuencia; con tres niveles de nutrición según conductividad eléctrica: bajo (B: 1,0 dS m⁻¹), medio (M: 2,0 dS m⁻¹) y alto (A: 3,0 dS m⁻¹) concentración de nutrientes (Cuadro 1). Los tratamientos de riego y nutrición se iniciaron a partir de la quinta semana de cultivo. Para definir los niveles de nutrición se utilizó como referencia una solución nutritiva considerada media (M) validada desde 2016 en el Programa de Hortalizas de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit-UCR. Los niveles de nutrición bajo (B) y alto (A) correspondieron a una reducción y un incremento del 50% de la solución media (M), manteniendo constante la proporción de nutrientes en todas las soluciones de los tres niveles de nutrición.

Cuadro 1. Tratamientos con dos estrategias de manejo del riego y tres niveles de nutrición en un cultivo de tomate en fibra de coco bajo invernadero.

Tratamiento combinado	Estrategia de manejo del riego	Nivel de nutrición	
		Concentración	CE (dS m ⁻¹)
E ₁ B	E ₁ : Menor volumen y mayor frecuencia	Baja (B)	1,0
E ₁ M		Media (M)	2,0
E ₁ A		Alta (A)	3,0
E ₂ B	E ₂ : Mayor volumen y menor frecuencia	Baja (B)	1,0
E ₂ M		Media (M)	2,0
E ₂ A		Alta (A)	3,0

Se utilizó un sistema de riego por goteo compuesto por válvulas solenoides, tuberías de polietileno con goteros antidrenantes y autocompensados (2 L h⁻¹). Los volúmenes de riego se estimaron basados en un porcentaje de agotamiento hídrico del agua total disponible (ATD) en el sustrato: 15% para E₁ y 30% para E₂, que correspondieron a valores de humedad del sustrato (θ) de 74% en E₁ y 70% en E₂. La activación del riego se realizaba automáticamente por medio de un sistema de riego a la demanda (SRD) que consistió en un algoritmo alimentado con datos en tiempo real de un caudalímetro (ARAD, mod. SF), un pluviómetro (ICT ECRN-100) y un sensor de humedad (Decagon, Mod. GS3). Cuando la θ disminuía hasta los valores de consigna establecidos para la E₁ y E₂, el algoritmo activaba el riego para reponer los volúmenes de agua estimados y obtener el porcentaje de drenaje deseado.

Para evaluar el efecto de los tratamientos se midieron las siguientes variables: volúmenes de riego, drenaje y evapotranspiración del cultivo (ET_c); conductividad eléctrica en drenaje (CE) y humedad volumétrica (θ) en el sustrato, peso seco (PS), área foliar (AF), rendimiento y eficiencia en el uso del agua (EUA).

La ET_c se estimó por medio de balance hídrico en el sustrato [8] a partir de los volúmenes ($L\ m^{-2}$) de riego (R) y drenaje (D), y la diferencia entre los contenidos de humedad volumétrica del sustrato ($\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$) al inicio (θ_i) y al final (θ_f) de un periodo semanal.

$$ET_c = R - D \pm \Delta\theta \quad (1)$$

La conductividad eléctrica (CE) en el drenaje fue medida semanalmente con conductímetro (HANNA Mod. HI98129) en submuestras recolectadas desde una bandeja para recolección de drenajes. La eficiencia en el uso del agua (EUA) se obtuvo como el cociente entre el rendimiento comercial ($R_c: kg\ m^{-2}$) y la evapotranspiración del cultivo ($ET_c: m^3\ m^{-2}$) [1].

$$EUA = \frac{R_c}{ET_c} \quad (2)$$

El PS ($g\ m^{-2}$) y el AF ($m^2\ planta^{-1}$) se evaluaron al final del ciclo en tres plantas por repetición. El PS se determinó en horno a $70\ ^\circ C$ hasta peso constante y el AF se cuantificó utilizando un medidor de área foliar (LI-COR MODEL 3100). El rendimiento de frutos ($kg\ planta^{-1}$) se cuantificó en 10 plantas por repetición, para un total de 30 plantas por tratamiento, con un grado de madurez entre pintón (30% rojo) y maduro (100% rojo). El rendimiento comercial se clasificó en tres categorías de frutos [9] en primera ($> 119\ g$), segunda (86 - 118 g) y tercera calidad (51 - 85 g). Además, se cuantificaron los frutos de desecho ($< 51\ g$) con daños físicos y mecánicos. El rendimiento total de frutos se obtuvo como la suma del rendimiento comercial más el desecho.

El experimento consistió en seis tratamientos distribuidos en un diseño irrestricto al azar con arreglo bifactorial (3×2) que combinaba dos estrategias de manejo del riego (E_1 y E_2) con tres niveles de nutrición (B, M y A), con tres repeticiones conformadas por 3 hileras de 5 tablas de fibra de coco con 3 plantas por tabla para un total de 45 plantas/repetición.

Los datos fueron sometidos a un análisis de normalidad y homocedasticidad para verificar los supuestos del análisis de varianza (ANDEVA). Una vez verificados los supuestos, se realizó el ANDEVA utilizando el software estadístico Infostat para determinar la posible existencia de interacción o efectos independientes entre los factores [10]. Cuando se identificó interacción entre los factores de riego y nutrición, se analizaron los efectos simples de los tratamientos mediante una comparación múltiple de medias (Tukey $P<0,05$). Cuando no hubo interacción ($P>0,05$) se analizaron los efectos independientes de cada factor mediante la comparación múltiple de medias (Tukey $P<0,05$).

Resultados y discusión

Balance Hídrico

El nivel de nutrición fue el único factor con efecto significativo ($P<0,05$) sobre los componentes del balance hídrico en el sistema de cultivo, donde se observó que a medida que incrementó la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, también aumentaron los volúmenes de riego y de ET_c (Fig. 1).

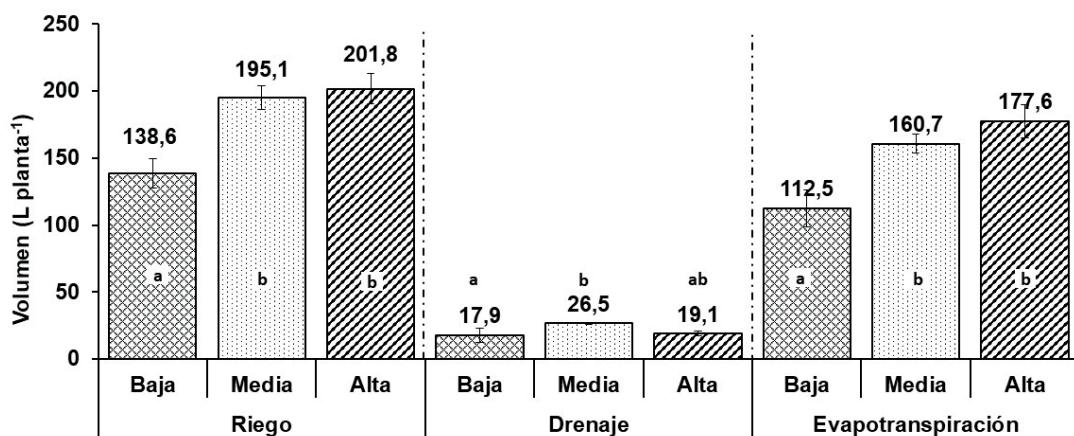


Figura 1. Componentes del balance hídrico ($\text{L planta}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$): riego, evapotranspiración (ET_c) y drenaje en un sistema de cultivo de tomate en fibra de coco bajo invernadero, con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva. Para cada variable, letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P<0,05$).

Los tratamientos con nutrición media y alta mostraron volúmenes de riego y de ET_c similares, y a la vez significativamente superiores ($P<0,05$) al tratamiento con nutrición baja. Estas diferencias evidenciaron que a mayores concentraciones de nutrientes, aumenta la demanda de agua para mantener el equilibrio hídrico en la planta, prevenir la salinización del sustrato y asegurar una adecuada absorción de nutrientes [11].

Este comportamiento en el balance hídrico estuvo estrechamente relacionado con parámetros morfológicos del cultivo, donde el AF y el PS aumentaron significativamente ($P<0,05$) conforme incrementó el nivel de nutrición (Fig. 2).

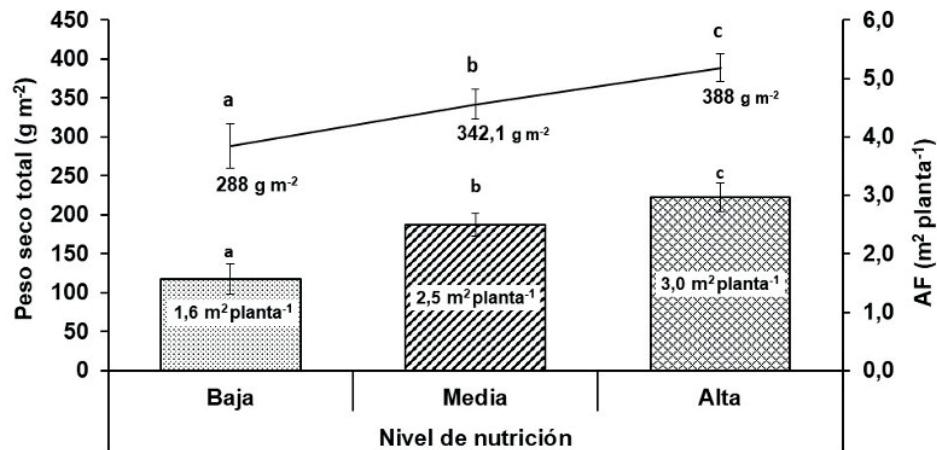


Figura 2. Peso seco y área foliar (AF) con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva en un cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Para cada variable, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P<0,05$).

Asimismo, un mayor crecimiento estuvo directamente asociado a una mayor transpiración, principal componente de la ET_c en cultivos hidropónicos donde la evaporación es mínima. Una mayor AF incrementó la transpiración debido a una mayor área expuesta al intercambio de agua con la atmósfera, elevando así la demanda hídrica del cultivo [12]. Muchos estudios han demostrado la relación entre el aporte de nutrientes y la creciente necesidad de agua

en los cultivos, asociado al incremento del AF, por ejemplo, altos aportes de nitrógeno y de riego aceleran la actividad fisiológica del cultivo, incrementando la demanda hídrica [13]. En contraste, la reducción en la fertilización combinada con riego deficitario ha demostrado disminuir la demanda hídrica relacionado con un menor crecimiento vegetativo lo que puede afectar el rendimiento [14], tal como sucedió en el presente estudio.

La gestión adecuada del riego y la nutrición es esencial para optimizar la ET_c en cultivos de tomate hidropónico en invernadero. Aunque los volúmenes de riego en los tratamientos con nutrición media y alta fueron comparables, el volumen de drenaje fue significativamente mayor ($P<0,05$) con nutrición media ($26,5 \text{ L planta}^{-1}$), atribuible a una menor ET_c relacionada con una menor AF. Esta situación favoreció un crecimiento más equilibrado entre fuente/sumidero, reflejado en un adecuado balance entre el aporte de nutrientes y la demanda de agua, y previniendo la acumulación de sales en el sustrato por el efecto de lavado. Aunado a lo anterior, la mayor demanda hídrica con nutrición alta como resultado de un mayor crecimiento ($>AF$ y PS), resalta la necesidad de un manejo cuidadoso del riego y la nutrición para evitar el exceso de drenaje y la lixiviación de nutrientes, para garantizar un uso eficiente del agua y los fertilizantes [6].

La tendencia a incrementar la ET_c conforme aumentó el nivel de nutrición, requiere riegos más frecuentes para evitar la salinización del sustrato. Diferentes estudios han demostrado que un correcto aporte de riego para garantizar un adecuado drenaje, junto con un aporte preciso de nutrientes, contribuye a mantener niveles estables de CE en el sustrato [15]. Por tal razón, aunque el incremento en el nivel de nutrición acrecentó la ET_c , el tratamiento con nutrición media mantuvo una adecuada CE en el drenaje, lo que benefició un balanceado crecimiento del cultivo, mejorando el rendimiento y la EUA. Dichos resultados evidencian que la gestión precisa del riego y la nutrición, son factores decisivos para evitar la lixiviación de nutrientes, lo que podría comprometer la eficiencia en el uso de dichos recursos y consecuentemente la calidad del cultivo [6].

Humedad volumétrica (θ) y conductividad eléctrica (CE) en drenaje

Ambas variables del manejo del riego fueron afectadas exclusivamente por el nivel de nutrición, mostrando una tendencia al incremento conforme aumentó la concentración de nutrientes en la solución nutritiva (Fig. 3).

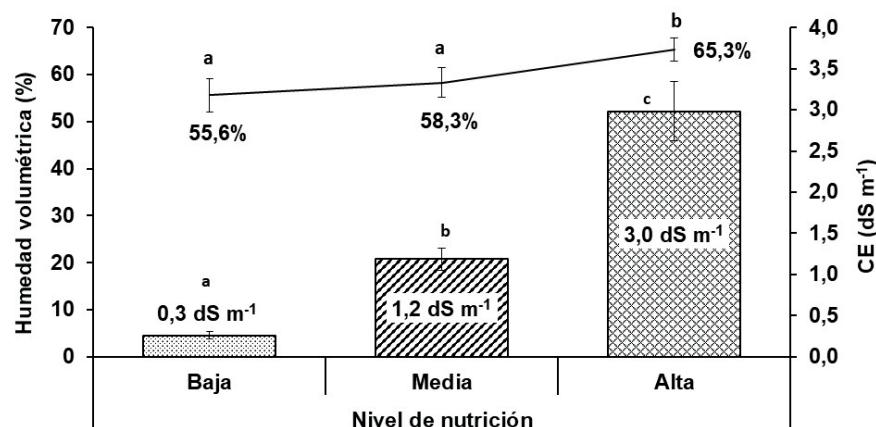


Figura 3. Humedad volumétrica en el sustrato y conductividad eléctrica (CE) en el drenaje, con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva en un cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Para cada variable, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P<0,05$).

El comportamiento de la relación entre la θ y la CE en el sustrato explica en gran parte, como influencia el manejo del ferti-riego la dinámica del agua y los nutrientes en el medio de cultivo, en la continua interacción sustrato-planta-clima. Mantener un balance adecuado de θ y CE es determinante para evitar la salinización del sustrato, maximizar la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes y mejorar la productividad de los cultivos [16]. La gestión precisa de estos parámetros no solo mejora la utilización de recursos, sino que también minimiza los riesgos asociados a la salinización, optimizando el rendimiento del cultivo [16]. Coincidiendo con estos hallazgos, Aslan *et al.*, [17] demostraron que niveles altos de nutrición aumentan significativamente el contenido de θ en comparación con bajos aportes de nutrientes, debido a un mayor efecto osmótico causado por la acumulación progresiva de sales minerales en el sustrato, lo que puede limitar la ET_c y afectar el equilibrio hídrico en sistemas hidropónicos. Aunque un mayor contenido de θ podría parecer beneficioso, este efecto positivo puede verse contrarrestado por la salinidad excesiva, ya que compromete la absorción de agua y de nutrientes por las raíces, lo que puede afectar negativamente el rendimiento del cultivo [18].

En este contexto, los tratamientos con nutrición alta mostraron mayores valores de CE en el drenaje, reflejando los efectos negativos de la acumulación de nutrientes. Altos niveles de CE en el sustrato generan un entorno osmótico adverso, disminuyendo el potencial osmótico y la conductividad en las raíces, lo que conduce a una menor absorción hídrica y nutricional, que puede inducir a estrés hídrico [19], [20].

Finalmente, la alta salinidad en el sustrato afecta negativamente la capacidad de almacenamiento de agua ya que provoca la compactación del sustrato, lo que reduce su porosidad [21] que a la vez limita la capacidad de aireación y retención de humedad, afectando así la disponibilidad de agua para las plantas. Estos hallazgos refuerzan la importancia de un manejo preciso y equilibrado del riego y la nutrición en sistemas hidropónicos, especialmente en condiciones de alta salinidad, para mantener un entorno radicular óptimo que asegure un equilibrio hídrico adecuado y optimice el crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate [22].

Rendimiento

En este estudio, únicamente el nivel de nutrición afectó ($P<0,05$) todos los componentes del rendimiento, excepto para los frutos de tercera calidad, donde no se observaron efectos independientes ni interacción entre los factores. Los tratamientos con nutrición baja registraron el menor rendimiento en todas las categorías de frutos. El rendimiento total fue similar entre los niveles de nutrición media y alta, con un promedio de 5 kg planta^{-1} (10 kg m^{-2}). Sin embargo, la regulación del riego mediante el sistema SRD, ajustado a las condiciones del dosel vegetal y el clima, junto con una concentración media de nutrientes, favoreció un mayor rendimiento en frutos de primera calidad y una menor producción de frutos de tercera calidad y desecho, en contraste con los resultados obtenidos en los tratamientos con nutrición alta (Fig. 4). En el cultivo de tomate en fibra de coco en invernadero, Liu *et al.*, [5] evaluó diferentes tasas de aplicación de soluciones nutritivas, reportando rendimientos totales ligeramente inferiores (4,3 a $6,17 \text{ kg m}^{-2}$) a una densidad de siembra ($2,5 \text{ plantas m}^{-2}$) a la del presente estudio.

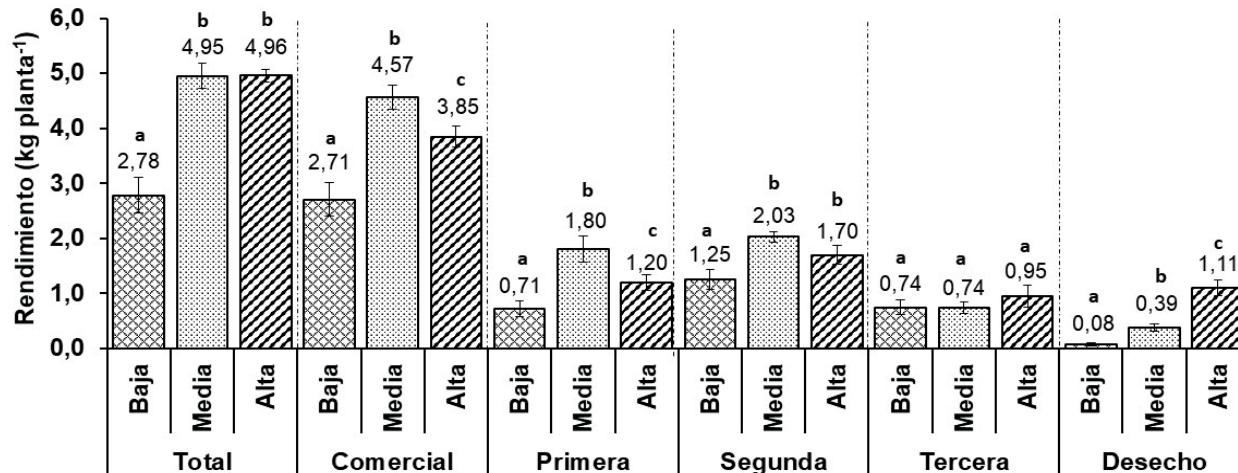


Figura 4. Rendimiento de frutos (kg planta^{-1}) total, comercial, de primera, segunda y tercera calidad y desecho, con baja, óptima y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva en el cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Alajuela, Costa Rica. Para cada categoría de frutos, letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P<0,05$).

Uno de los mayores efectos de altos niveles de nutrición es la acumulación de sales que generan altas CE en el medio de cultivo [23], [24], [25]. Al respecto, Nasir y Sato encontraron que niveles de CE entre 1,2 y 1,4 dS m^{-1} en solución nutritiva mejoraron el rendimiento y la calidad de los frutos en cultivo de tomate hidropónico; valores de CE bajos ($0,8\text{--}1,0 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$) limitaron el rendimiento debido a una insuficiente disponibilidad de nutrientes, mientras que valores altos ($>1.4 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$) podrían haber inducido estrés salino [23]. De forma similar, se identificó que concentraciones elevadas de nutrientes en solución nutritiva redujeron significativamente la calidad y el rendimiento de frutos de tomate cherry, asociando la alta CE ($2,9 \text{ dS m}^{-1}$) en el sustrato a deficiencias de calcio que aumentó el porcentaje de frutos de desecho [24], [25].

Eficiencia de uso de agua (EUA)

La EUA no fue afectada ($P>0,05$) por la interacción entre la estrategia de manejo del riego y el nivel de nutrición. No obstante, el nivel de nutrición afectó significativamente ($P<0,05$) la EUA para la mayoría de las categorías de frutos, excepto para los frutos de segunda calidad (Fig. 5).

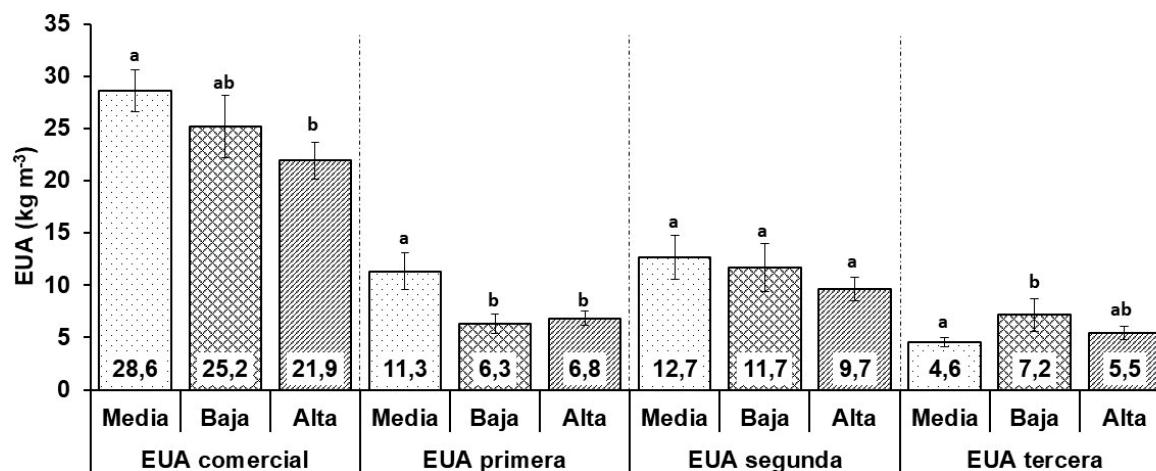


Figura 5. Eficiencia de uso de agua (EUA) en producción de frutos de calidad comercial, primera, segunda y tercera, en tratamientos con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva, en un cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Para cada categoría de frutos, letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P<0,05$).

La EUA para producción de fruto comercial total y de primera calidad fue superior ($P<0,05$) bajo nutrición media ($28,6 \text{ kg m}^{-3}$) en comparación con los tratamientos de nutrición alta y baja, que no mostraron diferencias significativas entre sí, con un promedio de $23,5 \text{ kg m}^{-3}$. Al mismo tiempo, la nutrición media resultó en la menor EUA para frutos de tercera calidad. Esto indica que tanto la nutrición deficiente como la excesiva, afectaron negativamente la EUA para la producción de frutos de alta calidad, mientras que promovieron un incremento en la EUA de frutos de tercera calidad (promedio: $6,3 \text{ kg m}^{-3}$), probablemente relacionado con valores elevados de CE y el consecuente estrés osmótico que limitó la absorción de agua y nutrientes. Los resultados demostraron que la EUA para la producción de frutos comerciales y de primera calidad es altamente sensible al manejo de la nutrición, evidenciando la importancia de ajustar las estrategias de manejo del riego y la nutrición para optimizar la demanda hídrica (ET_c), incrementar los rendimientos y, en consecuencia, mejorar la EUA..

La EUA es un parámetro decisivo para valorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Numerosos estudios han confirmado la importancia de un adecuado aporte de nutrientes junto a un manejo preciso del riego para maximizar la EUA [5], [6], donde el uso de tecnológicas tales como el manejo del riego por goteo automatizado con sensores en tiempo real han demostrado una mejora sensible en la EUA en los cultivos [26], [27]. Por ejemplo, la fertirrigación inteligente con recirculación y reutilización de drenajes incrementa significativamente la EUA [27], [28].

En el presente estudio, el tratamiento con nutrición media con riego ajustado automáticamente según la demanda del cultivo obtuvo una EUA de $28,6 \text{ kg m}^{-3}$. Comparado con sistemas de cultivo de tomate en suelo bajo invernadero con riegos deficitarios, Wu et al., reportaron valores inferiores ($22,9$ a $25,12 \text{ kg m}^{-3}$) [28]. En cultivos de tomate en suelo a campo abierto, Mendez et al., reportaron valores de EUA entre $7,3$ a $22,1 \text{ kg m}^{-3}$ (Méjico) y de $7,4$ a $17,0 \text{ kg m}^{-3}$ (costa mediterránea) [6], valore inferiores a los obtenidos en la presente investigación. Dichas diferencias podrían asociarse a las ventajas comparativas que ofrece el cultivo en sustratos bajo invernadero, donde el uso de sistemas de riego a la demanda del cultivo reduce las pérdidas de agua y nutrientes por lixiviación e incrementa la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas.

Las interrelaciones entre el balance hídrico, el manejo del ferti-riego y las características morfológicas del cultivo tales como el IAF y el PS, fueron determinantes en la ET_c y la EUA del tomate. Aunque el rendimiento fue menor con nutrición baja, la EUA fue alta debido a una menor demanda hídrica debido a un menor crecimiento vegetativo reflejado en menor AF y PS. En contraste, el tratamiento con alta nutrición elevó la conductividad eléctrica (CE) en el sustrato, lo cual tuvo un efecto osmótico negativo, dificultando la absorción de agua y nutrientes, y reduciendo el rendimiento y la EUA.

Conclusión

El manejo del riego automatizado según la demanda del cultivo junto con un nivel de nutrición media mejoró el rendimiento y calidad de frutos al favorecer niveles óptimos de humedad y salinidad en el sustrato de fibra de coco del cultivo de tomate bajo invernadero. De esta forma, la combinación de un nivel de nutrición medio con un control riguroso del riego ajustado a la demanda superó significativamente en eficiencia de uso del agua ($28,8 \text{ kg m}^{-3}$) a los tratamientos con nutrición alta y baja, independientemente de la estrategia de riego utilizada. Con nutrición media y riego a la demanda, la relación entre el rendimiento comercial ($5,0 \text{ kg planta}^{-1}$), la ET_c ($160 \text{ L planta}^{-1}$) y el volumen de drenaje ($26,5 \text{ L planta}^{-1}$), evidenció un balance hídrico adecuado entre sustrato, planta y clima. Consecuentemente, favoreció un adecuado nivel de humedad y drenaje que previno la salinización del sustrato, reflejado en menores valores de conductividad eléctrica ($1,2 \text{ dS m}^{-1}$). Esta interacción entre humedad y conductividad eléctrica

en el sustrato favoreció un entorno radicular óptimo, que a su vez promovió un crecimiento equilibrado entre fuente y sumidero, que potenció tanto el rendimiento en fruto de mayor calidad como la eficiencia en el uso del agua.

Referencias

- [1] F. Soto-Bravo, A. Betancourt-Flores, "Comportamiento vegetativo-generativo de tomate y chile dulce hidropónico en invernadero, sometidos a agotamiento hídrico," *Agronomía Costarricense*, vol. 47, no. 1, pp. 09-26, 2024.
- [2] H. J. Muhasin, A. Y. Gheni, N. I. I. Tajuddin, N. A. Izni, Y. Y. Jusoh y K. A. Aziz, "A systematic literature review for smart hydroponic system," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 1-10, 2024. DOI: 10.11591/eei.v13i1.4738.
- [3] F. Tran, J. Holland, N. Quesada, M. Young, D. Bienkowski, D. Savvas et al., "What evidence exists on the effectiveness of the techniques and management approaches used to improve the productivity of field-grown tomatoes under conditions of water-, nitrogen- and/or phosphorus-deficit? A systematic map," *Environmental Evidence*, vol. 10, pp. 1-17, 2021. DOI: 10.1186/s13750-021-00229-9.
- [4] H. Li, X. Mei, J. Wang, F. Huang, W. Hao, y B. Li, "Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China," *Agricultural Water Management*, vol. 244, pp. 106534, 2021. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2020.106534.
- [5] S. Liu, X. Qiang, H. Liu, Q. Han, P. Yi, H. Ning, H. Li, C. Wang y X. Zhang, "Effects of nutrient solution application rates on yield, quality, and water-fertilizer use efficiency on greenhouse tomatoes using grown-in coir," *Plants*, vol. 13, pp. 1-20, 2024. DOI: 10.3390/plants13060893.
- [6] H. Méndez, R. Perttierra, y C. Balmaseda, "Eficiencia del agua en tomate cultivado en sustrato inerte," *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 10, no. 2, pp. 23-34, 2023, doi: 10.26423/rctu.v10i2.753.
- [7] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), "UNE-EN 13041: Mejoradores de suelos y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total," Madrid, España, AENOR. 2007.
- [8] F. Soto-Bravo y Rodríguez-Ocampo, "Crecimiento, evapotranspiración y uso de nutrientes en cultivo hidropónico de *Eryngium foetidum*, en dos diferentes ambientes y niveles de nutrición," *Agronomía Costarricense*, vol. 46, no. 1, pp. 09-26, 2021.
- [9] Quesada, G, "Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato," *Agronomía Costarricense* vol. 39, no. 1, pp. 25-36, 2015.
- [10] J. A. Di Rienzo, A. W. Guzmán, F. Casanoves, "InfoStat, versión 2012," Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2002
- [11] U. Shareef, A. U. Rehman, y R. Ahmad, "A systematic literature review on parameters optimization for smart hydroponic systems," *AI*, vol. 5, no. 3, pp. 73-85, 2024. DOI: 10.3390/ai5030073.
- [12] S. Guo, L. Wu, X. Cao, X. Sun, Y. Cao, Y. Li y H. Shi, "Simulation Model Construction of Plant Height and Leaf Area Index Based on the Overground Weight of Greenhouse Tomato: Device Development and Application," *Horticulturae*, vol. 10, no. 3, pp. 270, 2024. DOI: 10.3390/horticulturae10030270.
- [13] X. Wang, J. Yun, P. Shi, Z. Li, P. Li, y Y. Xing, "Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels," *Journal of Plant Growth Regulation*, vol. 38, pp. 400-415, 2019. DOI: 10.1007/s00344-018-9850-7.
- [14] X. Gong, R. Qiu, J. Sun, J. Ge, L. Yanbin, y S. Wang, "Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation," *Agricultural Water Management*, vol. 235, pp. 106154, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106154.
- [15] D. Neocleous y D. Savvas, "Validating a smart nutrient solution replenishment strategy to save water and nutrients in hydroponic crops," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, pp. 1-12, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.965964.
- [16] T. Ahn, J.-S. Yang, S. Park, H. W. Moon, y J. Y. Lee, "Translation of irrigation, drainage, and electrical conductivity data in a soilless culture system into plant growth information for the development of an online indicator related to plant nutritional aspects," *Agronomy*, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10091306.

- [17] G. E. Aslan, R. Baştuğ, C. Karaca, A. Kurunç, D. Buyuktas, y A. Navarro, "Effects of saline irrigation water applications on evapotranspiration partitioning and crop coefficient of tomato grown in Mediterranean-type greenhouses," *Agronomy*, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14081771.
- [18] R. Madugundu, K. A. Al-Gaadi, E. Tola, V. C. Patil y N. Sigrimis, "The Impact of Salinity and Nutrient Regimes on the Agro-Morphological Traits and Water Use Efficiency of Tomato under Hydroponic Conditions," *Applied Sciences*, vol. 13, pp. 9564, 2023. DOI: 10.3390/app13179564.
- [19] E. Choi, Y. Woo, S. Min, K. Choi y Y. Lee, "Nutrient solution concentration effects on non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor," *Journal of Plant Nutrition*, vol. 37, no. 6, pp. 748–764, 2014. DOI: 10.1080/01904167.2013.868479.
- [20] M. Alfosea-Simón, E. A. Zavala-González, J. M. Cámara-Zapata, J. J. Martínez-Nicolás, I. Simón, S. Simón-Grao, y F. García-Sánchez, "Effect of foliar application of amino acids on the salinity tolerance of tomato plants cultivated under hydroponic system," *Scientia Horticulturae*, vol. 272, pp. 109509, 2020. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109509.
- [21] S. T. Patil, U. S. Kadam, M. Mane, D. M. Mahale y J. S. Dhekale, "Hydroponic Growth Media (Substrate): A Review," *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 21, no. 23, pp. 106–113, 2020. DOI: 10.9734/irjpac/2020/v21i2330307.
- [22] D. Savvas, E. Stamati, I. Tsirogiannis, N. Mantzos, P. Barouchas, N. Katsoulas y C. Kittas, "Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems," *Agricultural Water Management*, vol. 91, pp. 102–111, 2007. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2007.05.001.
- [23] N. Nasir y T. Sato, "Effect of nutrient solution concentration on growth, yield, and fruit quality of tomato grown hydroponically in single-truss production system," *Journal of Horticultural Research*, vol. 31, no. 2, pp. 45–53, 2023. doi: 10.2478/johr-2023-0034.
- [24] N. S. Dias, A. A. Diniz, P. L. D. Morais, G. S. Pereira, F. V. S. Sá, B. G. A. Souza, L. F. Cavalcante, y M. F. Neto, "Yield and quality of cherry tomato fruits in hydroponic cultivation," *Bioscience Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 1470–1477, 2019. DOI: 10.14393/BJ-v35n5a2019-42345.
- [25] N. S. Dias, A. A. Diniz, P. L. D. Morais, G. S. Pereira, F. V. S. Sá, B. G. A. Souza, L. F. Cavalcante, y M. F. Neto, "Yield and quality of cherry tomato fruits in hydroponic cultivation," *Bioscience Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 1470–1477, 2019. DOI: 10.14393/BJ-v35n5a2019-42345.
- [26] R. Liao, S. Zhang, X. Zhang, M. Wang, H. Wu, y L. Zhangzhong, "Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept," *Agricultural Water Management*, vol. 245, art. no. 106632, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106632.
- [27] Q. Wang, Y. Jia, Z. Pang, J. Zhou, K. E. Scriber II, B. Liang y Z. Chen, "Intelligent fertigation improves tomato yield and quality and water and nutrient use efficiency in solar greenhouse production," *Agricultural Water Management*, vol. 298, 2024, Art. no. 108873. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108873.
- [28] S. Wu, Q. Li, B. Cao, y L. Yu, "Responses of growth, fruit yield, quality, and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation," *Scientia Horticulturae*, vol. 275, art. no. 109710, 2021. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109710.

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.

¿Energía nuclear, biomásica o eólica? Una aproximación desde el enfoque de ciclo de vida

Nuclear, biomass, or wind energy? An approach from the life cycle perspective

Daniel Rodriguez-Rivas¹, Deborah Colombo-Vegas²,
Julio Rojas-Gómez³, Gustavo Richmond-Navarro⁴

Fecha de recepción: 20 de diciembre, 2024

Fecha de aprobación: 23 de abril, 2025

Rodriguez-Rivas, D; Colombo-Vegas, D; Rojas-Gómez, J;
Richmond-Navarro, G. ¿Energía nuclear, biomásica o eólica?
Una aproximación desde el enfoque de ciclo de vida. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025.
Pág. 182-190.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7742>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ d.rodriguezrivas@gmail.com

✉ <https://orcid.org/0009-0001-9492-4647>

2 Institucional PALFINGER AG - Salzburg, Austria.
✉ dcolombovegas@gmail.com

✉ <https://orcid.org/0009-0001-2407-0041>

3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ jrojas@tec.ac.cr

✉ <https://orcid.org/0000-0003-1375-2191>

4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
✉ grichmond@tec.ac.cr

✉ <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>



Palabras clave

Ciclo de vida; energía nuclear; energía eólica; biomasa; huella de carbono; matriz EPM; EPD.

Resumen

Las fuentes de energía renovables han representado una alternativa para evitar recurrir a los combustibles fósiles y el alto impacto ambiental que estos conllevan. Sin embargo, estas fuentes de energía no están exentas de producir emisiones de carbono al ambiente. Con el fin de cuantificar la huella de carbono generada por la producción de energía mediante fuentes como la energía nuclear, biomásica o eólica; se abordó un análisis de las emisiones de carbono dadas en cada etapa del ciclo de vida de cada una de estas, consultando distintas fuentes bibliográficas y delimitando la información recopilada a datos publicados a partir del año 2010. Dicha información se distribuyó en tres cuadros para realizar una comparativa entre cada etapa de las distintas fuentes de energía y determinar cuál de estas produce una menor huella de carbono a lo largo de su ciclo de vida. Se consultaron además distintos registros de la utilización de las fuentes de energía en cuestión dentro del contexto de la región de América Latina, esto con el fin de analizar el impacto de los distintos factores socioeconómicos presentes y determinar la viabilidad de la utilización de estas fuentes de energía.

Keywords

Life cycle; nuclear energy; wind energy; biomass; carbon footprint; EPM Matrix; EPD.

Abstract

Renewable energy sources are an alternative to reduce reliance on fossil fuels and mitigate the high environmental impact associated with them. However, these energy sources are not exempt from generating carbon emissions. To quantify the carbon footprint associated with energy generation from sources such as nuclear, biomass, and wind energy, an analysis was conducted on the carbon emissions at each stage of the life cycle of each source. A variety of bibliographic sources were consulted, focusing on data published from 2010 onward. The information was organized into three tables to facilitate comparisons across each life-cycle stage of the different energy sources and to determine which produces a lower carbon footprint overall. Additionally, records on the use of these energy sources in the Latin American region were consulted to analyze the impact of various socioeconomic factors and assess the feasibility of adopting these energy sources.

Introducción

Toda actividad humana genera impactos en el entorno, y con el crecimiento de la población y su consumo, igualmente se aumenta la necesidad de agua, alimentos y energía, pudiendo atribuirse a cada uno de ellos una huella ambiental, siendo la huella de carbono una de las más comúnmente estudiadas [1]. Particularmente la energía, es crucial para el desarrollo de prácticamente todas las actividades vitales económicas: producción de bienes y prestación de servicios, calefacción o refrigeración de edificios y fábricas, transporte, construcción, preparación y conservación de alimentos, entre otros. Sin embargo, globalmente se estima que 660 millones de personas carecen de acceso a fuentes energéticas consolidadas, o bien cerca de 2000 millones de personas dependen de fuentes contaminantes. Lo anterior hace que aproximaciones mundiales atribuyan al sector energético el 60% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. En consecuencia, propuestas como los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS) plantean en su ODS no. 7 la búsqueda de energía asequible y no contaminante, y amparados en esquemas como el Acuerdo de París, las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (o NDC por sus siglas en inglés) presentan el compromiso voluntario de que los países establezcan acciones para adaptarse al cambio climático, garantizar financiación para este fin, y limitar así el aumento medio de la temperatura global a 1,5°C [2]. Siendo el sector energético la principal causa del cambio climático [3], las NDC sin duda incluyen el estudio y las acciones respecto a la energía como uno de sus capítulos.

La discusión en torno a cuál fuente energética resulta más sostenible es intensa y las decisiones requieren de fundamento para que un país, o una región se decante por una u otra alternativa. Por esto es vital estudiar esta materia desde bases científicas y metodológicas sólidas.

En esta investigación se responden a las interrogantes: ¿Cuál es el impacto medioambiental resultante de la energía nuclear, biomásica y eólica en todo su ciclo de vida? ¿Cuál de estos tres tipos diferentes de energía genera la menor huella de carbono? Por lo anterior, la importancia de este artículo reside en la realización de un análisis de datos secundarios destinado a abordar, al menos en parte, las interrogantes previamente planteadas.

En primer lugar, es necesario abordar conceptos como el análisis del ciclo de vida. “El análisis del ciclo de vida (ACV) es una metodología de evaluación ambiental mediante la cual se pueden analizar y cuantificar todos los aspectos ambientales de un producto, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida. El estudio incluye todas las etapas de su existencia, es decir, las etapas que van desde la extracción y procesamiento de las materias primas, su manufactura, transporte, distribución, uso, reutilización o reciclaje y la disposición final de los residuos.” [4]. En síntesis, el ACV trata de un análisis cuantitativo sobre el ciclo de vida de un producto o servicio.

La cuantificación del impacto suele medirse a través de distintas metodologías, principalmente “ReCiPe midpoint” y “ReCiPe endpoint”, usadas en países de la Unión Europea, y “Environmental Performance Indicators (EPD)”, el cual se utiliza de manera más globalizada y en Latinoamérica. En el caso de este artículo se utilizó EPD como metodología base para suministrar información sobre el impacto ambiental del ciclo de vida [5] de la producción energética a partir de distintas fuentes.

El artículo se centró en cuantificar mediante uno de los impactos negativos mayormente estudiados, la huella de carbono o potencial de calentamiento global de la producción de energía, considerando cuatro fases de su ciclo de vida: extracción y recolección de materiales, construcción de la planta de producción de energía, operación y desmantelamiento.

La huella de carbono según [6] es definida como la cuantificación del efecto del impacto sobre el clima y la producción de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida de todos los productos y servicios consumidos. Asimismo, como fue expuesto en [7], esta se refiere de una manera más frecuente a la huella de carbono como el peso de las emisiones de GEI, y es común que sea dado en CO_2 equivalente (CO_2e) al considerar el potencial de calentamiento global de los GEI emitidos en el caso en estudio y expresarlos en dicha unidad equivalente [8].

Sobre este tipo de análisis existen algunas investigaciones, como en el caso de la tesis “Comparación del impacto ambiental de los sistemas energéticos a base de nuclear, biomasa y gas utilizando el análisis del ciclo de vida” [9]. En esta se realiza un análisis de la energía obtenida a partir del gas natural, con un enfoque a la utilización de estas energías en su país. El autor siguió la siguiente metodología: primero realizó una revisión bibliográfica sobre las energías, esto lo hizo con artículos y publicaciones desde el año 2000 hasta el 2016, luego identificó los impactos y estrategias de mitigación del impacto ambiental con el fin de realizar una comparación de los resultados de la huella de carbono de los ciclos de vida y una cualificación

de estos utilizando la metodología de la matriz EPM (Evaluación de Proyectos, Metodología Arbolada). Al final, el autor concluyó que la energía biomásica destaca entre las tres analizadas, como la de menor impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida. Sin embargo, añadió que la nuclear cuenta con una cantidad de emisiones similares pero sus riesgos asociados siempre deben de ser considerados.

Teniendo como premisa el enfoque desarrollado por Galvis [9], la presente investigación tiene por objetivo comparar de manera general (no por país), de cuál tipo de energía, nuclear, biomásica o eólica, genera menor huella de carbono por kilowatt-hora. Si bien no presenta alternativas de mitigación, ofrece un insumo para avanzar en la discusión en Costa Rica y en el contexto latinoamericano, sobre los impactos y las posibles decisiones por tomar cuando se consideren alternativas de generación de energía, las cuales deben ser abordadas según metas y contexto del país.

Materiales y métodos

Siguiendo la metodología propuesta por el ACV en la norma 14044 [10], se definió que el objetivo y alcance se basarían en comparar la huella de carbono en un sistema delimitado por las siguientes etapas del ciclo de vida estudiado: la recolección y extracción de los materiales, la construcción, el tiempo de operación, el fin de vida o desmantelamiento y la durabilidad promedio. En el caso de la energía biomásica, se decidió enfocar la búsqueda solo para el proceso de combustión y el proceso de co-combustión, además de que sea con fines energéticos. La unidad funcional (UF) se determinó como la emisión de gramos de dióxido de carbono equivalentes entre la producción eléctrica por hora (gCO_2e / kWh). Esto se le conoce como mix eléctrico, lo cual es un factor de emisión de la energía eléctrica, esto según la Oficina Catalana de Cambio Climático [11].

Para la fase de análisis del inventario (ICV) y Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) en estudio, se realizó un análisis de tipo cuantitativo basado en una revisión de literatura no sistemática, a partir de publicaciones con fecha desde el año 2010. Se ejecutó la búsqueda en las bases de datos "ScienceDirect", "Scielo", "Google Scholar" y "Scopus", y se enriqueció la investigación desde algunos sitios web de organizaciones mundiales como lo son la "United Nations Economic Commission for Europe" (UNECE). Se utilizaron las palabras claves "huella de carbono", "ciclo de vida", "energía eólica", "biomasa", "biomásica", "energía nuclear", "impacto ambiental de las energías renovables", "impacto ambiental de la energía nuclear", "EPD", "combustión", "co-combustión", "potencial de calentamiento global", "carbon footprint", "life cycle", "wind energy", "biomass", "biomassic", "nuclear energy", "environmental impact of renewable energy", "environmental impact of nuclear energy", "global warming potential".

De esta recopilación de documentos y artículos web, se seleccionaron los datos por utilizar para la comparación de cada una de las etapas del ciclo de vida de cada una de las energías tratadas en el artículo y se procedió a la interpretación de los resultados.

Con los datos mencionados se construyeron cinco cuadros. Los tres primeros cuadros recopilaron la información individual de las etapas de cada una de las energías, además de contar con la cantidad total generada de huella de carbono, este número se obtuvo realizando la suma de los datos de las cuatro etapas, asimismo se añadió el promedio de cada etapa y del total. El cuarto cuadro se construyó utilizando los datos promedios de las fases y el total de los tres métodos de transformación de energía juntos. Por último, el quinto cuadro se realizó con la referencia de la durabilidad de los tres métodos.

Resultados

Para el primer caso, la energía eólica, se obtuvo la información del ciclo de vida de cuatro distintos modelos, dos terrestres y dos marinos, cuyos resultados/cifras se encuentran en el Cuadro 1. Se pueden observar datos negativos en la sección de fin de vida, esto es según [12], debido al reciclaje de materiales.

Cuadro 1. Datos de las emisiones de huella de carbono durante el ciclo de vida de plantas de energía eólica. Fuente: Autor mediante datos de [12].

Tipo	Modelo	Materiales (gCO_2e / kWh)	Construcción (gCO_2e / kWh)	Operación y mantenimiento (gCO_2e / kWh)	Fin de vida (gCO_2e / kWh)	Total (gCO_2e / kWh)
Terrestre	SWT-2.3-108	4,65	0,25	0,10	-1,00	5,00
	SWT-3.2-113	3,72	0,16	0,12	-0,76	4,00
Marino	SWT-4.0-130	7,30	1,40	1,30	-1,70	10,00
	SWT-6.0-154	5,25	0,84	0,91	-1,26	7,00
Promedio	----	5,23	0,66	0,61	-1,18	6,50

En el caso de la energía nuclear, se obtuvieron los datos promedio a nivel mundial de su ciclo de vida. Estos datos fueron recopilados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Dato promedio de las emisiones de huella de carbono durante el ciclo de vida de plantas de energía nuclear. Fuente: Autor mediante datos de [13].

Tipo	Materiales (gCO_2e / kWh)	Construcción (gCO_2e / kWh)	Operación y mantenimiento (gCO_2e / kWh)	Fin de vida (gCO_2e / kWh)	Total (gCO_2e / kWh)
Promedio	2,83	0,82	1,49	0,36	5,50

Los datos de la energía biomásica, durante el proceso de combustión y el de co-combustión, se encuentran recopilados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Datos de las emisiones de huella de carbono durante el ciclo de vida de la biomasa. Fuente: Autor mediante datos de [14].

Tipo	Materiales (gCO_2e / kWh)	Construcción (gCO_2e / kWh)	Operación y mantenimiento (gCO_2e / kWh)	Fin de vida (gCO_2e / kWh)	Total (gCO_2e / kWh)
Combustión	8,60	0,08	3,02	0,04	11,74
	18,14	0,08	3,02	0,04	21,28
Co-combustión	9,44	0,11	14,14	0,04	23,73
	18,14	0,11	13,50	0,04	31,79
Promedio	13,58	0,10	8,42	0,04	22,14

En el Cuadro 4 se puede observar una recopilación de los datos promedio de los tres métodos de transformación de energía en cada una de sus fases de ciclo de vida. En el caso de la biomasa, se considera únicamente la producción de esta para fines energéticos.

Cuadro 4. Cuadro comparativo de los ciclos de vida de la energía eólica, nuclear y biomasa. Fuente: Autor mediante datos de [12], [13], [14].

Fases	Eólica	Nuclear	Biomásica
Materiales (gCO_2e / kWh)	5,23	2,83	13,58
Construcción (gCO_2e / kWh)	0,66	0,82	0,10
Operación y mantenimiento (gCO_2e / kWh)	0,61	1,49	8,42
Fin de vida (gCO_2e / kWh)	-1,18	0,36	0,04
Total (gCO_2e / kWh)	6,50	5,50	22,14

En el Cuadro 5 se compiló la durabilidad general de las plantas generadoras de energía de los tres tipos tratadas en este artículo.

Cuadro 5. Durabilidad de las plantas de energía eólica, nuclear y biomasa. Fuente: Autor mediante datos de [13], [14], [15].

Tipo	Durabilidad (años)
Eólica	20 a 25
Nuclear	60
Biomásica	20 a 30

Observando el Cuadro 4, se puede afirmar que en el total de mix eléctrico generado durante todo su ciclo de vida, la que genera una menor huella de carbono es la energía nuclear, seguida de la eólica y por último la biomásica. Se puede observar que en los tres métodos de generación de energía la fase que más genera huella de carbono es la recolección de materiales, esto en la mayoría de los casos es porque se toma en cuenta todo lo relacionado, desde la extracción de recursos, la construcción de las herramientas necesarias para ello, el combustible utilizado para su transporte, entre otras.

Asimismo, en el Cuadro 4 se observa que la fase que menor huella de carbono por kilowatt hora genera en los tres tipos de energía es la última fase, el fin de vida, la cual cuenta con el desmantelado de la planta, hasta el reciclado de materiales.

Cabe recalcar que, en cada caso estudiado, las emisiones generadas son de carbono biogénico, lo cual significa que este no incide en los niveles de concentración de CO_2 en la atmósfera como lo haría el carbono generado por combustibles fósiles. El carbono biogénico está presente en el ciclo natural del carbono donde el CO_2 liberado es equivalente al que será reabsorbido por nuevas plantas posteriormente [16].

Para analizar estos datos dentro del contexto nacional, se toma como referencia el estudio realizado por Galvis [9], el cual compara el impacto ambiental de las fuentes de energía utilizadas en Colombia. En el caso de la biomasa, el principal material base para la generación de este tipo de energía proviene de los residuos producto de los diferentes cultivos realizados por el sector agrícola del país, lo cual significa que el aprovechamiento de estos residuos para la producción energética ayuda a reducir la huella de carbono para ambos sectores implicados

en el proceso. Por otro lado, la energía nuclear no presenta muchos casos de aplicación a gran escala en la región que puedan ser utilizados como referencia, en el caso de Colombia, solamente cuenta con un reactor nuclear con una capacidad de 30 kilovatios, el cual es empleado para investigación solamente. Factores como el costo de inversión inicial, manejo de desechos y el mantenimiento exhaustivo que representa la energía nuclear podrían ser los causantes de que no haya tantos casos presentes de esta en la región latinoamericana, lo cual representaría un reto a superar si se quiere lograr una mayor capacidad energética con menor impacto de carbono en la región.

Conclusiones

Después de analizar el ciclo de vida de las fuentes de energía nuclear, eólica y biomásica, considerando sus principales etapas —extracción y recolección de materiales, construcción, operación y mantenimiento, y fin de vida—, se identificaron y compararon las huellas de carbono asociadas a cada tecnología. Este análisis permitió establecer un marco cuantitativo que evidencia las diferencias en el impacto ambiental de estas fuentes energéticas.

Con base en los datos obtenidos y una revisión bibliográfica exhaustiva, se presentan a continuación las conclusiones clave de este estudio:

1. La energía que genera menor huella de carbono durante su ciclo de vida según los resultados es la energía nuclear. Generando un total de $5,5 \text{ gCO}_2e / \text{kWh}$ durante todo su ciclo de vida y esto durante su tiempo de vida de 60 años.
2. La energía eólica es la segunda de las tres analizadas que genera menor huella de carbono. Generando un total de $6,5 \text{ gCO}_2e / \text{kWh}$ durante su ciclo de vida y con un tiempo de vida promedio de 20 a 25 años.
3. La energía que más genera huella de carbono de las tres estudiadas es la biomásica, generando un total de $22,14 \text{ gCO}_2e / \text{kWh}$ durante su ciclo de vida y con un tiempo de vida promedio de 20 a 30 años.

El análisis presentado se basa en datos específicos y casos de estudio, lo que ofrece una referencia general sobre el impacto ambiental de las fuentes de energía evaluadas. Sin embargo, es esencial considerar que cada planta de producción energética puede presentar particularidades únicas derivadas de factores tecnológicos, económicos, geográficos y sociales, los cuales influyen significativamente en los resultados finales.

Por lo tanto, la adopción y comparación de estas tecnologías deben realizarse en función del contexto específico de cada región. Este enfoque permite tomar decisiones informadas y adaptadas a las necesidades particulares del entorno energético.

Además, este estudio proporciona una visión comparativa integral sobre las emisiones de carbono asociadas a cada fuente energética a lo largo de su ciclo de vida. Aunque los resultados reflejan los casos específicos analizados, subraya la importancia de factores contextuales que determinan tanto las emisiones finales como la viabilidad de implementación. En este sentido, el presente análisis se posiciona como una herramienta valiosa para la toma de decisiones en el sector energético y un punto de partida para futuras investigaciones orientadas a la sostenibilidad y la adaptación regional y global de estas tecnologías.

Agradecimientos

Se agradece a los asistentes del LIENE, Laboratorio de Investigación en Energía Eólica del TEC, quienes brindaron su apoyo y colaboración en la realización de esta investigación. Adicionalmente, se extiende un sincero agradecimiento a Laura Brenes-Peralta por su valiosa contribución y orientación en este trabajo.

Referencias

- [1] Omolola A. Ogbolumani y Nnamdi I. Nwulu, "Environmental impact assessment for a meta-model-based food-energy-water-nexus system", Energy Reports, vol. 11, pp. 218-232, 2024, doi: <https://doi.org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.egyr.2023.11.033>
- [2] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, "¿Qué son las NDC y cómo impulsan la acción climática?", Climate Promise, 2023. Accedido el 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible: <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/que-son-las-NDC-contribuciones-determinadas-nivel-nacional-cambio-climatico>
- [3] Naciones Unidas, "Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna" Objetivos de desarrollo sostenible, 2023. Accedido el 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [4] M. Rodriguez. "Análisis del ciclo de vida: ISO 14040 - geoinnova". GeoInnova, 2016. Accedido el 30 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: https://geoinnova.org/blog-territorio/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040/?gclid=Cj0KCQjAnsqdBhCGARIaAYjYjSrXrJbM80zAMYoWtsORgAk05_YVENfkDluaO7xLr3c1H9SF4tuSlcaAtprEALw_wcB
- [5] The International EPD System. "Environmental performance indicators | EPD international". EPD International. Accedido el 21 de abril de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.environdec.com/resources/indicators>
- [6] J. O. Valderrama, C. Espíndola y R. Quezada, "Huella de Carbono, un Concepto que no puede estar Ausente en Cursos de Ingeniería y Ciencias", Formación Universitaria, Vol. 4(3), pp. 3-12, 2011.
- [7] T. Wiedmann y J. Minx, "A Definition of Carbon Footprint", Durham: ISAUK Research & Consulting, 2007.
- [8] United States Environmental Protection Agency, "Understanding Global Warming Potentials", Greenhouse Gas Emissions, 2023. Accedido el 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible: [https://www.epa.gov/ghg-missions/understanding-global-warming-potentials#:~:text=The%20Global%20Warming%20Potential%20\(GWP,carbon%20dioxide%20CO2\)](https://www.epa.gov/ghg-missions/understanding-global-warming-potentials#:~:text=The%20Global%20Warming%20Potential%20(GWP,carbon%20dioxide%20CO2))
- [9] J. F. Galvis, "Comparación del impacto ambiental de los sistemas energéticos a base de nuclear, biomasa y gas utilizando el análisis del ciclo de vida", resumen extendido de tesis, Univ. Pontif. Boliv. Secc. Bucaramanga, Bucaramanga, 2016.
- [10] INTECO (2007). INTE/ISO 14044:2007. Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y Directrices.
- [11] Oficina Catalana del Cambio Climático. "Factor de emisión de la energía eléctrica: El mix eléctrico". Cambio climático. Accedido el 16 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: https://canviclimate.gencat.cat/es/actual/factors_demissio_associats_a_la_energia/
- [12] J. L. Canga. "La huella de carbono de las energías renovables. 2- eólica". Comunidad ISM. Accedido el 16 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.comunidadism.es/la-huella-de-carbono-de-las-energias-renovables-2-eolica/>
- [13] T. Gibon, Á. Hahn y M. Guiton, "Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options", UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, GENEVA, 2022.
- [14] F. Sebastián, J. Royo y M. Gómez, "Cofiring versus biomass-fired power plants: GHG (Greenhouse Gases) emissions savings comparison by means of LCA (Life Cycle Assessment) methodology", Energy, Vol 36, Issue 4, pp. 2029-2037, 2011.
- [15] J. Menéndez y J. Loredo. "An economic assessment of lignocellulosic biomass power plants". E3S Web of Conferences, 2020. Accedido el 10 de enero de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/51/e3sconf_reee2020_02003.pdf
- [16] E. Vikjær-Andresen, "CO2 biogénico: una posible solución a la crisis climática", Foro Económico Mundial, 2023. Accedido el 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible: <https://es.weforum.org/agenda/2023/10/co2-una-solucion-a-la-crisis-climatica-siempre-que-sea-del-tipo-verde-y-frondoso/>

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.

Caracterización de rendimiento computacional en plataformas embebidas para aplicaciones de Edge AI en modelos de detección de personas

Performance characterization on embedded systems for Edge AI person-detection models

Laura Cabrera-Quirós¹, Kimberly Orozco-Retana²

Fecha de recepción: 24 de enero, 2025

Fecha de aprobación: 8 de mayo, 2025

Cabrera-Quirós, L; Orozco-Retana, K. Caracterización de rendimiento computacional en plataformas embebidas para aplicaciones de Edge AI en modelos de detección de personas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 191-201.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7754>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 lcabrera@itcr.ac.cr
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 asdkimberlyasd@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0004-8241-4991>

Palabras clave

Edge AI; NVIDIA Jetson Nano; Raspberry Pi 4; MLPerf Inference Benchmark; SSD-MobileNet.

Resumen

Este documento presenta una caracterización del rendimiento del hardware para dos plataformas de Edge AI: Raspberry Pi 4 y NVIDIA Jetson Nano, para la tarea de detección automática de personas utilizando un modelo de aprendizaje profundo. Con fines comparativos, utilizamos el sistema de evaluación MLPerf Inference Benchmark. La caracterización considera los resultados de un modelo de detección de objetos SSD-MobileNet utilizando dos conjuntos de datos diferentes, uno con 80 clases de objetos distintas y otro solo con personas. Las métricas de comparación consideran la precisión del modelo, la latencia, las consultas procesadas por segundo y las muestras procesadas por segundo bajo la evaluación de diferentes escenarios de ejecución.

Keywords

Edge AI; NVIDIA Jetson Nano; Raspberry Pi 4; MLPerf Inference Benchmark; SSD-MobileNet.

Abstract

This paper presents a hardware performance characterization for two Edge AI platforms: Raspberry Pi 4 and NVIDIA Jetson Nano, for the task of automatic people detection using a deep learning model. For comparison purposes, we use the MLPerf Inference Benchmark evaluation system. The characterization considers the results from an SSD-MobileNet object-detection model using two different datasets, one with 80 different object classes and another with only people. Comparison metrics consider model accuracy, latency, queries processed per second, and samples processed per second under the evaluation of different execution scenarios.

Introducción

Actualmente existe una tendencia de crecimiento vertiginoso en la cantidad de datos disponibles y la necesidad de su procesamiento autónomo y continuo para diferentes tareas, donde también la baja latencia en las aplicaciones finales se ha convertido en una demanda común. La inteligencia artificial (IA) en el borde o Edge AI surge como una solución para procesar los datos mediante modelos de IA cerca de la fuente de la información mediante dispositivos de bajo consumo [1].

Para esto, el uso de sistemas embebidos o empotrados como plataformas de soporte se ha vuelto una práctica normal. Sin embargo, la implementación de IA en sistemas embebidos, en específico algoritmos de alta demanda computacional como las redes neuronales, requiere de una reconciliación entre elementos de hardware y software de la plataforma. Alternativas incluyen el uso de redes neuronales artificiales más pequeñas, en donde los modelos a utilizar estén cuantificados, comprimidos y/o podados. Por otro lado, los sistemas embebidos modernos proveen características adicionales como aceleradores, GPUs y NPUs para soportar dichos modelos.

Por su parte, la detección de objetos consiste en detectar automáticamente instancias de objetos de una o varias clases conocidas en imágenes o video; y es ampliamente utilizada por distintas industrias. Los modelos de detección de personas se enfocan específicamente en esta clase en particular, usando por lo general modelos basados en redes neuronales [2].

Aún cuando el uso de modelos de detección de personas en sistemas embebidos para aplicaciones Edge AI es un tema de gran impacto y aplicabilidad, existen pocas caracterizaciones de este tipo de modelos para su uso eficiente en plataformas embebidas de recurso computacional reducido. En su mayoría, estas comparaciones y caracterizaciones se enfocan en servidores de alta escala [1]. No obstante, conocer qué tipo de modelo o algoritmo mapea mejor a una plataforma embebida en específico le puede permitir a investigadores e industria utilizar de forma óptima sus recursos. En los últimos años se han desarrollado caracterizaciones de rendimiento utilizando diversos estándares como AloTbench, IoTbench o pCAMP [1] para distintos sistemas embebidos. Sin embargo, muchas de las caracterizaciones realizadas se han enfocado en tareas como traducción, otras tareas de visión como clasificación y reconocimiento de voz. Más no consideran la tarea de detección automática de objetos en la diversidad de su dominio.

Este artículo presenta una caracterización de rendimiento para un modelo de detección ampliamente utilizado en sistemas embebidos, como lo es el MobileNet, en dos plataformas embebidas aptas para uso en Edge AI: la Raspberry Pi 4 Modelo B y la NVIDIA Jetson Nano. Para garantizar una comparación correcta y escalable, se utilizó el estándar MLPerf Inference Benchmark [3].

MLPerf Inference Benchmark

El estándar MLPerf Inference es un conjunto de programas de evaluación para inferencia de modelos de inteligencia artificial que mide el rendimiento de inferencia del hardware, el software y los servicios de aprendizaje automático con métricas adecuadas y un método de evaluación comparativa de manera justa [3]. MLPerf Inference Benchmark Suite incluye programas de evaluación que cubren tres tareas de inferencia: clasificación de imágenes, detección de objetos, y reconocimiento de voz y traducción. Estas tareas pueden ser evaluadas bajo cuatro distintos escenarios: Flujo único, Flujo múltiple, Servidor y Fuera de línea. Dichos escenarios permiten emular el comportamiento de carga de trabajo de aprendizaje automático que se tiene en el mundo real para dispositivos móviles, vehículos autónomos, y configuraciones basadas en la nube. Los cuatro escenarios de ejecución serían:

- Flujo único: representa un flujo de consulta de inferencia con un tamaño de muestra de 1, lo que refleja aplicaciones cliente donde la capacidad de respuesta es crítica. Su métrica recomendada es la latencia del percentil 90 del flujo de consultas.
- Flujo múltiple: representa aplicaciones con un solo flujo de consultas, pero cada consulta comprende múltiples inferencias, lo que refleja tareas de automatización industrial y detección remota. Su métrica de rendimiento es el número entero de flujos que admite el sistema mientras cumple con el requisito de calidad de servicio (QoS, por sus siglas en inglés).
- Servidor: representa aplicaciones en línea donde la llegada de consultas es aleatoria y la latencia es importante. La métrica de rendimiento es el parámetro de Poisson que indica las consultas por segundo (QPS, por sus siglas en inglés) que se pueden lograr mientras se cumple el requisito de QoS.
- Fuera de línea: representa aplicaciones de procesamiento por lotes donde todos los datos están disponibles de inmediato y la latencia no está restringida. La métrica para el escenario fuera de línea es el rendimiento medido en muestras por segundo.

Plataformas embebidas a caracterizar

Adicional a estas plataformas, se utiliza una computadora Dell Inc. Inspiron 5567, como la base de comparación en el rendimiento de los sistemas embebidos.

Raspberry Pi 4 Modelo B

Raspberry Pi es desarrollada por *Raspberry Pi Foundation* [4]. Las Raspberry Pi tienen suficiente capacidad para realizar automatización doméstica, gracias a su microprocesador Quad core Cortex-A72 (ARM v8) de 64-bit SoC @ 1.8GHz. Esto permite implementar aplicaciones industriales e implementar computación en el borde para una amplia variedad de aplicaciones, a bajo costo.

NVIDIA Jetson Nano

Como parte de la primera serie de sistemas NVIDIA Jetson Nano, el kit de desarrollador NVIDIA Jetson Nano 2GB revolucionó la informática integrada al brindar el poder de la inteligencia artificial a los dispositivos computacionales de última generación. La tarjeta proporciona una interfaz GPIO para conectarse a módulos de dispositivos externos. Cuenta con CPU ARM A57 y tiene una GPU Maxwell de 128 núcleos [5].

Modelo de detección y conjunto de datos

Modelo SSD-MobileNet

El enfoque del detector de disparo único o *Single Shot Detector* (SSD) se basa en una red convolucional de avance que produce una colección de cuadros delimitadores de tamaño fijo con puntuaciones para la presencia de instancias de clase en esos cuadros, seguido de un paso de supresión no máxima para producir las detecciones finales. Las primeras capas de la red se basan en una arquitectura estándar utilizada para la clasificación de imágenes de alta calidad, pero truncada antes de las capas de clasificación, llamada red base [6]. En el caso de este trabajo la red base que utiliza es MobileNet, de modo que la arquitectura final se distingue con el nombre SSD-MobileNet. Los modelos MobileNet son modelos de clasificación eficientes para aplicaciones de visión móvil e integradas. Se enfocan principalmente en optimizar la latencia, generando redes pequeñas construidas principalmente a partir de convoluciones separables en profundidad. Este tipo de convolución es una forma de convolución factorizada, que como su nombre lo indica factoriza una convolución estándar en una convolución en profundidad y una convolución 1x1 denominada convolución puntual [7].

MS-COCO

Microsoft COCO (*Common Objects in Context*) es un conjunto de datos de detección de objetos a gran escala, de acceso libre y altamente utilizado mundialmente. El conjunto de datos comprende imágenes de escenas cotidianas complejas que contienen objetos comunes en su contexto natural. Los objetos se etiquetan utilizando segmentaciones por instancia para ayudar a localizarlos de forma precisa [8]. Además, presenta separaciones consistentes entre conjuntos de entrenamiento, validación y prueba; para fomentar la reproducibilidad y comparación de resultados.

En 2017 la división de entrenamiento/validación se cambió. El conjunto de prueba utilizado (COCOval2017) es un subconjunto de 41000 imágenes del conjunto de prueba de 2015 [9]. La nueva división usa las mismas imágenes y anotaciones. Este conjunto de validación contiene 5000 imágenes con 80 tipos de objetos en la nueva división.

Además, COCO tiene varios tipos de anotaciones: para detección de objetos, detección de puntos clave, segmentación de cosas, segmentación panóptica, densa y subtítulos de imágenes. Para este trabajo se utilizaron solamente las anotaciones de objetos usando cuadros delimitadores.

Metodología y esquema de pruebas

Implementación de MLPerf Inference Benchmark en plataformas embebidas

Para implementar el estándar de pruebas es necesario contar con un sistema operativo funcional en cada plataforma embebida a evaluar. Para esto en cada sistema se deben contar con los archivos necesarios para la instalación de MLPerf Inference Benchmark en almacenamiento. Estos se pueden descargar desde el repositorio dedicado oficial.

Posteriormente, se realiza la instalación del generador de carga o *LoadGen*, que es un generador de tráfico para MLPerf Inference que carga el sistema bajo prueba (SUT, por sus siglas en inglés) y mide su rendimiento. Además, recopila información de registro, depuración y post-procesamiento de datos [3]. El generador de carga registra las consultas y las respuestas del SUT y al final de la ejecución reporta las estadísticas, resúmenes de resultados y determina si la ejecución fue válida.

Una vez instalado el generador de carga, es posible cargar datos y modelos bajo escenarios específicos de ejecución mediante comandos en la terminal del sistema haciendo uso de archivos Unix shell.

Preparación de datos

El modelo SSD-MobileNet utiliza el tamaño de imagen de 300x300, por lo que el conjunto de datos para las pruebas (incluyendo imágenes y anotaciones) debe escalarse a un tamaño de imagen 300x300. Posteriormente, se extrae un subconjunto de datos de 100 imágenes y se conserva el archivo dimensionado de anotaciones 300x300 de más de 80 clases de objetos etiquetados en el COCOval2017. A este subconjunto se le llamará *all_objects_300*. Además, se extrae un segundo subconjunto de datos de 100 imágenes que contienen solamente instancias de la clase 'persona', a este se le llamará *person_objects_300*. En ese caso se extraen de las anotaciones 300x300 solamente la información de imágenes que tengan instancias de personas.

Es importante enfatizar que el modelo utilizado está pre-entrenado utilizando el conjunto de entrenamiento de MSCOCO. Los subconjuntos propuestos serán utilizados solamente para pruebas.

Escenarios de ejecución

Se propone ejecutar 4 pruebas con cada subconjunto de datos extraído de COCOval2017 en cada plataforma embebida, contemplando los cuatro escenarios de ejecución de MLPerf Inference Benchmark. Cada escenario representa el entorno de funcionamiento de distintas tareas de inferencia. Aunque algunos de ellos no son específicamente representativos para la detección de objetos, se busca brindar una caracterización que considere todos los escenarios y brinde a quien diseñe los subsecuentes sistemas un panorama más completo de las capacidades de las plataformas en diversos escenarios.

La Figura 1 muestra un esquema que integra los dos conjuntos de datos en el sistema de pruebas MLPerf Inference Benchmark y la metodología de prueba propuesta.

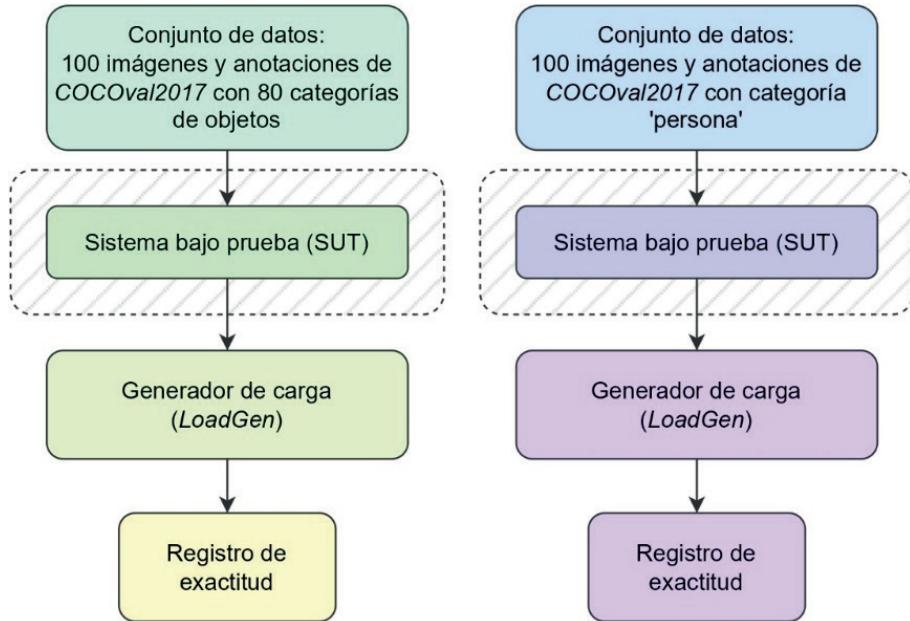


Figura 1. Esquema de integración en MLPerf Inference Benchmark para ejecución de pruebas.

Resultados y discusión

Para las pruebas propuestas y cada una de las plataformas a caracterizar, se calculan las siguientes métricas de rendimiento: exactitud del modelo de detección, tiempos de inferencia, latencia del percentil 90, consultas por segundo y muestras por segundo. Los resultados para las mismas se detallan a continuación.

Pruebas de exactitud

Las pruebas de exactitud permiten medir cuán efectivo es un modelo en la tarea de detectar objetos, en este caso personas. Para este efecto se utilizan las métricas de precisión promedio media (*mean average precision* o mAP) y exactitud (*accuracy*), las cuales son ampliamente utilizadas en investigación sobre detección de objetos [10]. Estas se calculan realizando las pruebas en cada plataforma y utilizando dos subconjuntos de datos mencionados.

El cuadro 1 desglosa los resultados de mAP y exactitud para el modelo SSD-Mobilenet con dos conjuntos de datos distintos según las plataformas bajo prueba.

Cuadro 1. Métricas de mAP y exactitud para modelo SSD-Mobilenet según plataformas bajo prueba y conjuntos de datos considerados.

Plataforma	Conjunto de datos: all_objects_300			Conjunto de datos: person_objects_300		
	Modelo	mAP (%)	Exactitud (%)	Modelo	mAP (%)	Exactitud (%)
Dell Inspiron	SSD-Mobilenet	33.55	94.06	SSD-Mobilenet	27.48	62.10
Raspberry Pi 4	SSD-Mobilenet	33.55	94.06	SSD-Mobilenet	27.48	62.10
Jetson Nano CPU	SSD-Mobilenet	33.55	94.06	SSD-Mobilenet	27.48	62.10
Jetson Nano GPU	SSD-Mobilenet	33.55	94.06	SSD-Mobilenet	27.48	62.10

Los resultados muestran que se mantiene la exactitud y mAP en todas las plataformas, corroborando que el desempeño de SSD-MobileNet se mantiene consistente independientemente de la plataforma para un mismo conjunto de datos. De acuerdo con [11], los modelos MobileNet tienen un rango de mAP dentro del 18% al 25% cuando se realiza inferencia utilizando el conjunto de datos COCOVal2017, lo que se logra replicar.

Tiempo de inferencia

El tiempo de inferencia representa la cantidad de tiempo promedio que tarda un modelo en detectar un objeto para una entrada dada. Valores más bajos de tiempo de inferencia indican un mayor rendimiento de la plataforma.

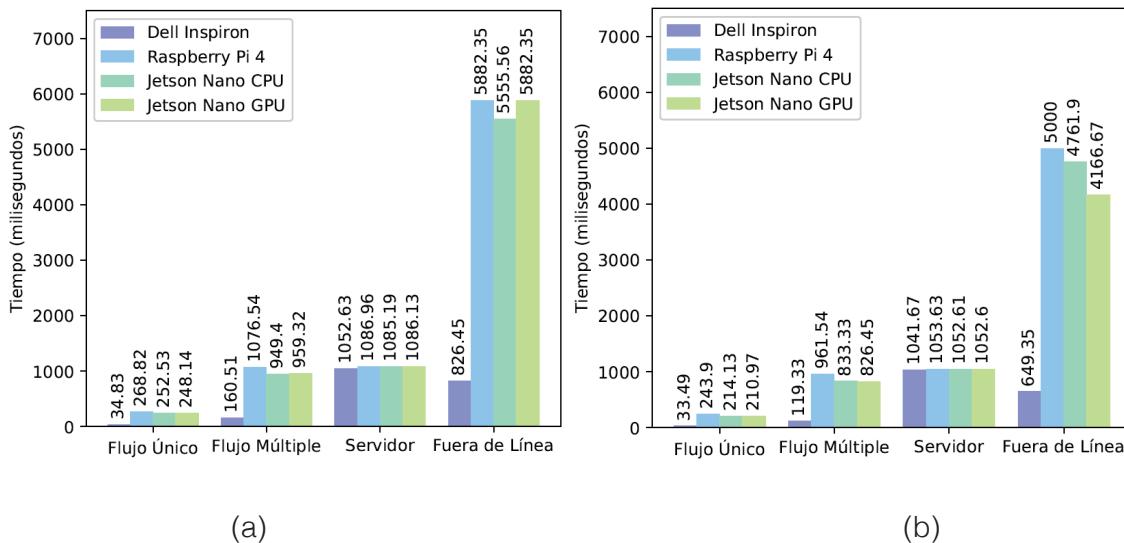


Figura 2. Tiempo de inferencia para todos los escenarios utilizando (a) Subconjunto *all_objects* y (b) Subconjunto *person_objects*.

La Figura 2 muestra los tiempos de inferencia para los cuatro escenarios disponibles considerando dos conjuntos de datos. La diferencia entre los tiempos de ejecución de acuerdo con cada plataforma muestra a las dos plataformas embebidas con tiempos de inferencia similares considerando ambos conjuntos de datos.

Considerando los escenarios de ejecución se observan los tiempos de inferencia más bajos (rondando los 200 - 300 milisegundos) para el escenario de Flujo Único. Por su parte, el escenario Fuera de Línea presenta tiempos de inferencia más altos de estas pruebas. En este escenario el tiempo de inferencia significativamente mayor se asocia el tamaño del lote a procesar, ya que en este escenario se procesan lotes de imágenes más grandes en comparación a escenarios de flujo múltiple o único. Un tamaño mayor de lote implica procesar varias imágenes en paralelo, lo que aumenta el tiempo de inferencia total.

Latencia del percentil 90

Una métrica de rendimiento específica para el escenario de Flujo Único es la latencia del percentil 90 del flujo de consultas. Este escenario representa un solo flujo de entrada crítica, como podría ser el flujo proveniente de una cámara de video. La medición específica de la latencia en este percentil está asociada con el procesamiento del 90% de las consultas en un tiempo específico.

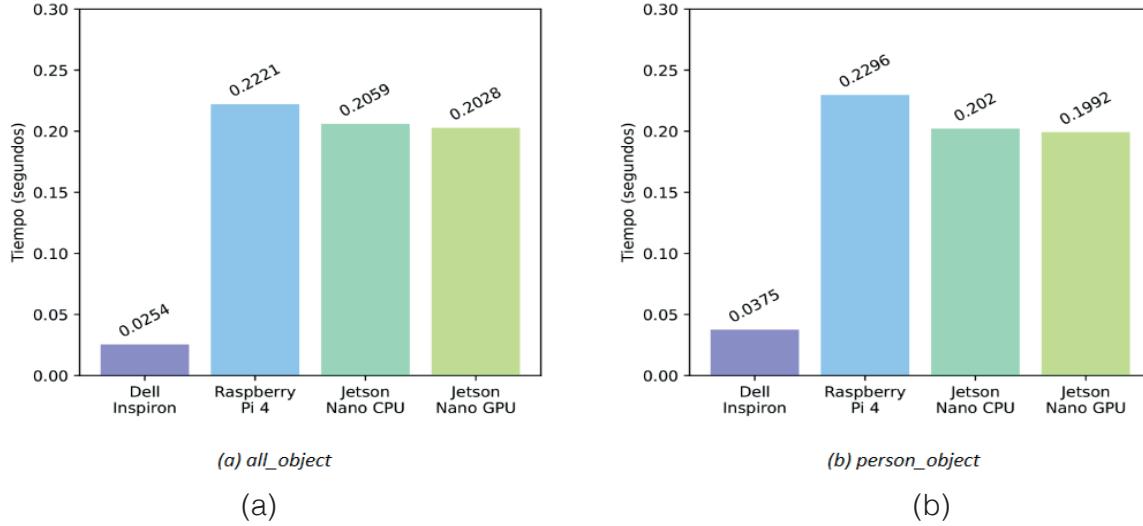


Figura 3. Latencia del percentil 90 para escenario Flujo Único utilizando (a) Subconjunto *all_objects* y (b) Subconjunto *person_objects*.

Los resultados de esta latencia al ejecutar las pruebas en cada plataforma se pueden visualizar en la Figura 3. Considerando estos resultados es posible notar una latencia levemente mayor para Raspberry Pi 4 respecto a los dos modos de ejecución de Jetson Nano. Además, en contraste, el uso de diferentes conjuntos de datos no muestra cambios en los resultados de latencia para SSD-Mobilenet.

En general, los resultados de latencia en Flujo Único para SSD-Mobilenet pueden considerarse consistentes en la detección para las dos plataformas embebidas, tanto para los objetos de 80 clases como para la categoría específica de ‘persona’. Resultados como baja latencia hace a SSD-Mobilenet apto para implementaciones críticas donde se tenga un solo flujo de consultas, aún en plataformas de recursos limitado como la Raspberry Pi 4.

Consultas por segundo

En casos donde se representen aplicaciones con un solo flujo de consultas, pero con múltiples inferencias como la detección remota con múltiples cámaras de video (Flujo Múltiple), o bien casos donde la llegada de consultas es aleatoria (Servidor), es importante conocer la métrica de consultas por segundo o QPS procesadas por el sistema.

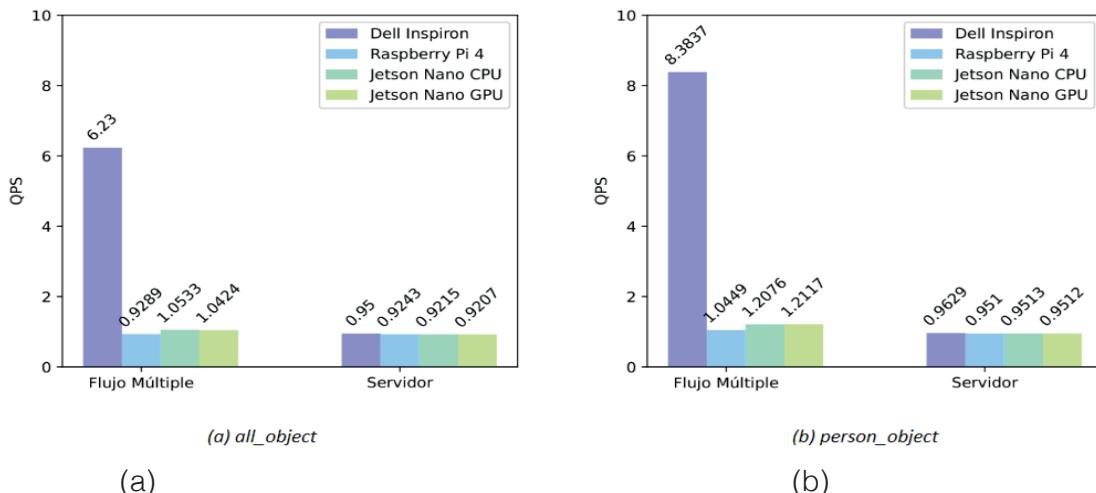


Figura 4. Consultas por segundo escenario Flujo Múltiple y servidor utilizando (a) Subconjunto *all_objects* y (b) Subconjunto *person_objects*.

Al realizar este conjunto de pruebas es importante conocer los parámetros fijos de ejecución en cada escenario, dado que en caso Servidor, la latencia restringe la cantidad de consultas por segundo que puedan ingresar, así como en el caso de Flujo Múltiple donde la diferencia entre las muestras exige límites de latencia para procesar una consulta entrante. En este caso se trabaja con una latencia fija de 50ms previamente establecido por el sistema de pruebas de inferencia. La Figura 4 muestra los resultados de la aplicación de pruebas en las plataformas de acuerdo con los dos escenarios relevantes.

De manera general, se nota un desempeño similar en las consultas por segundo en ambos escenarios para las plataformas embebidas. Estos resultados se complementan con los obtenidos en la sección de tiempos de inferencia, donde se puede apreciar la congruencia en los tiempos de inferencia y QPS para el escenario Servidor. El tiempo de inferencia y el QPS están inversamente relacionados. Un tiempo de inferencia más bajo implica mayor velocidad de procesamiento de las solicitudes, lo que a su vez conduce a un QPS más alto. Por otro lado, un tiempo de inferencia más alto disminuye la velocidad de procesamiento de las solicitudes, lo que resulta en un QPS más bajo. En este caso, los resultados de tiempo de inferencia son similares para ambos escenarios en ejecución, lo que se refleja en los resultados de la Figura 4. Las diferencias entre plataformas embebidas son mínimas tomando en consideración ambos escenarios. Además, las diferencias entre conjuntos de datos no marcan una diferencia significativa para las plataformas embebidas.

Muestras por segundo

Finalmente, el escenario Fuera de Línea no representa ambientes de inferencia críticos sino aplicaciones de procesamiento por lotes donde todos los datos están disponibles de inmediato. Así, la latencia no está restringida y el tiempo de inferencia no es crítico, por lo que la métrica de rendimiento se reduce a las muestras procesadas por segundo. La Figura 5 muestra los resultados de las muestras por segundo procesadas por segundo bajo la ejecución del escenario Fuera de Línea.

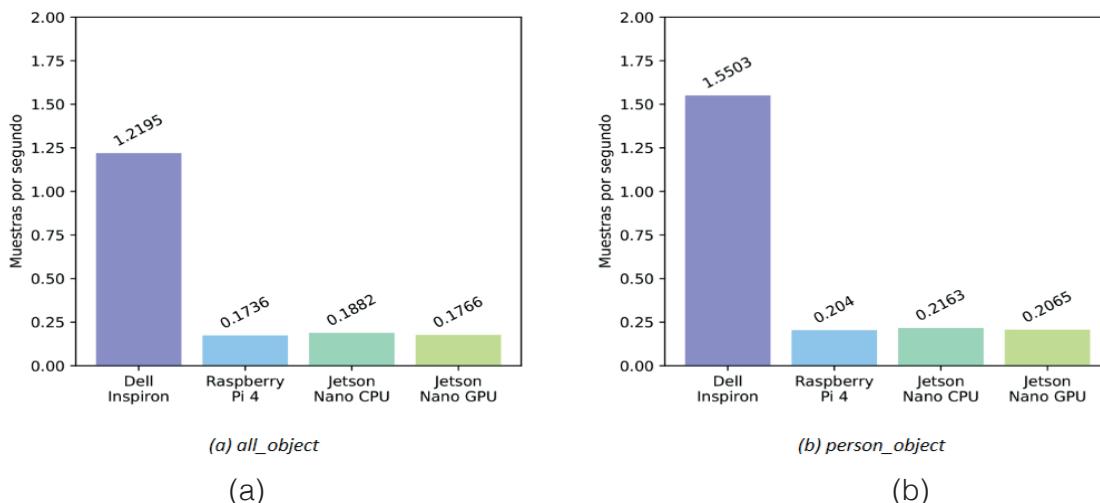


Figura 5. Muestras procesadas por segundo escenario Fuera de Línea utilizando
(a) Subconjunto *all_objects* y (b) Subconjunto *person_objects*

En términos de las plataformas embebidas se aprecia un comportamiento similar en el número de muestras procesadas por segundo. Los resultados de la Figura 5 se complementan con los expuestos en la sección de tiempo de inferencia en cuanto al tiempo que le toma al modelo

SSD-Mobilenet realizar una inferencia bajo el escenario Fuera de Línea. En el caso de las plataformas embebidas, la tasa de procesamiento de muestras se encuentra muy por debajo de la unidad por segundo.

Análisis de rendimiento según escenarios

Considerando las plataformas evaluadas solo en términos de caracterización, es posible considerar un mayor rendimiento de la Jetson Nano en sus dos modos de ejecución sobre el rendimiento de Raspberry Pi 4 de manera general. Esto es claro a partir de un rendimiento para la detección (mAP o exactitud) equivalente entre plataformas, pero con latencias más bajas para la Jetson Nano en ambas configuraciones. No obstante, esta diferencia es mínima. Resalta además la similitud de los resultados para la evaluación de la Jetson Nano trabajando con GPU en comparación a su funcionamiento únicamente como CPU. Intuitivamente, se podría esperar que al utilizar una GPU cuya naturaleza en paralelización le da mayor poder computacional se obtengan tiempos de ejecución menores. Sin embargo, aunque hay una reducción en tiempos y latencias esta es mínima. Este comportamiento puede ser explicado pues para todas las evaluaciones solo se realizaron pruebas a los modelos, más no así su entrenamiento. Así, es conocido que la fase de entrenamiento de un modelo de aprendizaje automático es aquella que requiere mayor poder computacional [12] y, por ende, se beneficia de la presencia de una GPU. Este no es necesariamente el caso para la fase de prueba, donde se realiza solamente inferencia.

Ahora bien, si se considera el costo de cada plataforma según el precio por unidad, NVIDIA Jetson Nano 2GB tiene un precio de mercado de 59\$, mientras que Raspberry Pi 4 2GB tiene un precio de 49.5\$. Sin embargo, actualmente NVIDIA no produce esta unidad [13] optando por un modelo más costoso.

Tomando en cuenta lo anterior, el desempeño de Raspberry Pi 4 la hace una buena contendiente de la Jetson Nano para la misma aplicación. Las pequeñas diferencias en las métricas de rendimiento permiten visualizar potenciales implementaciones utilizando modelos más livianos que realicen la misma tarea que SSD-Mobilenet. Además, considerando el costo por unidad y la vigencia de la producción, es posible considerar a Raspberry Pi 4 como una plataforma apta para realizar implementaciones.

Conclusiones y trabajo futuro

Las plataformas Edge AI evaluadas demuestran resultados competentes para la tarea de detección de personas dentro del rango de mAP usual para modelos con redes base MobileNet 18% - 25% entrenado para la detección de 80 clases distintas.

Si bien se logran resultados muy prometedores para la detección automática de personas haciendo uso de SSD-MobileNet, este solo brinda un panorama reducido de las verdaderas capacidades de las plataformas evaluadas. Considerar más arquitecturas de modelos ampliaría este panorama.

El desempeño de las métricas obtenidas refleja la detección de objetos como una tarea de múltiples escenarios, dependiendo de la aplicación final. Es posible llevar a la implementación sistemas que comprendan uno o varios flujos de consultas para escenarios críticos, o bien una implementación que considere los beneficios de la nube para realizar inferencias cuando las plataformas de borde así lo requieran. Sin embargo, considerando la capacidad limitada y la afinidad de las plataformas Edge AI, la inferencia fuera de línea no representa un uso eficiente de estas.

Como trabajo futuro, se recomienda tomar en cuenta una variedad más amplia de modelos de detección, así como modelos afinados para la detección exclusiva de personas, con el fin de acotar la verdadera capacidad de las plataformas evaluadas en este trabajo para una tarea específica. Para lograr esto es posible considerar alternativas como MLHarness [14] que aborda las limitaciones de modelos entrenados por MLPerf Inference Benchmark mediante un sistema escalable de evaluación comparativa que se adapta a éste. Con esta herramienta sería posible utilizar modelos pre-entrenados de diferentes fuentes para ampliar el rango de caracterización de las plataformas evaluadas.

Referencias

- [1] B. Varghese, N. Wang, D. Bermbach, C.-H. Hong, E. D. Lara, W. Shi y C. Stewart, «A Survey on Edge Performance Benchmarking,» *ACM Computing Surveys*, vol. 54, n° 3, pp. 1-33, Abril 2022.
- [2] Z. Zhou, K. Chen, Z. Shi, Y. Guo y J. Ye, «Object Detection in 20 Years: A Survey,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, n° 3, pp. 257-276, Marzo 2023.
- [3] V. J. Reddi, C. Cheng, D. Kanter, P. Mattson, G. Schmuelling, C.J. Wu, B. Anderson, M. Breughe, M. Charlebois, W. Chou et al., «MLPerf Inference Benchmark,» *ACM/IEEE 47th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, pp. 446-459, 2020.
- [4] E. Upton y G. Halfacree, *Raspberry Pi user guide*, John Wiley & Sons, 2016.
- [5] F. N. Uzun, M. Kayrici y B. Akkuzu, «Nvidia Jetson Nano Development Kit,» *Programmable Smart Microcontroller Cards*, p. 82, 2021.
- [6] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed, C.-Y. Fu y A. C. Berg, «SSD: Single Shot MultiBox Detector,» de *European conference on computer vision*, 2016.
- [7] A. G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand, M. Andreetto y H. Adam, «MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications,» Publisher: arXiv Version Number: 1, 2017. [En línea]. Available: <https://arxiv.org/abs/1704.04861>.
- [8] T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár y C. L. Zitnick, «Microsoft COCO: Common Objects in Context,» *Computer Vision – ECCV 2014*, vol. 8693, pp. 740-755, 2014.
- [9] «COCO dataset - Common Objects in Context,» [En línea]. Available: <https://cocodataset.org/#home>. [Último acceso: Julio 2025].
- [10] R. Padilla, S. L. Netto y E. Da Silva, «A survey on performance metrics for object-detection algorithms,» de *International conference on systems, signals and image processing (IWSSIP*, 2020.
- [11] W. Wang, W. Hong, F. Wang y J. Yu, «GAN-Knowledge Distillation for One-Stage Object Detection,» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 60719–60727, 2020.
- [12] Y. Hu, N. Chen, Y. Hou, X. Lin, B. Jing y P. Liu, «Lightweight deep learning for real-time road distress detection on mobile devices,» *Nature Communications*, vol. 16, n° 1, 2025.
- [13] NVIDIA Developer, «Documentation Jetson Nano 2GB Developer Kit,» [En línea]. Available: <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/jetson-nano-2gb-devkit-user-guide>. [Último acceso: Julio 2025].
- [14] Y.-H. Chang, J. Pu, W.-m. Hwu y J. Xiong, «MLHarness: A scalable benchmarking system for MLCommons,» *BenchCouncil Transactions on Benchmarks, Standards and Evaluations*, vol. 1, 2021.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial disponible en <https://www.deepl.com/en/> translator para traducir partes de este artículo del inglés al español. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Gestión del conocimiento mediante observatorios

Knowledge management through observatories

Giannina Ortiz-Quesada¹, Agustín Francesa-Alfaro²,
Alonso Poveda-Montoya³, Gustavo Rojas-Moya⁴

Fecha de recepción: 10 de febrero, 2025

Fecha de aprobación: 18 de junio, 2025

Ortiz-Quesada, G; Francesa-Alfaro, A; Poveda-Montoya, A; Rojas-Moya, G. Gestión del conocimiento mediante observatorios. *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, N° 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 202-218.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7848>

1 Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 gortiz@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-7639-1499>

2 Escuela de Administración de Tecnologías de Información. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

 afrancesa@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-8001-0676>

3 Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 apoveda@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0005-2349-9208>

4 Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 icgrojas@outlook.com

 <https://orcid.org/0000-0003-3367-6165>



Palabras clave

Observatorio de investigación; análisis de datos; sector construcción; planificación; toma de decisiones.

Resumen

Considerando que la toma de decisiones relacionadas con el sector construcción en Costa Rica ha carecido de fuentes de información de fácil acceso y estandarizadas, aun cuando se cuenta con entidades de gran prestigio que generan datos valiosos, como el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos, Universidades Públicas, Ministerios, Instituciones Autónomas, Municipalidades, el Sistema Nacional de Información Pública, el Registro Nacional, la Cámara de la Construcción, entre otros. De igual forma, se observa un desarrollo urbano desordenado, carente de planificación, generando un aumento de impactos negativos al medio ambiente, aumentando los plazos de ejecución de proyectos, con poco análisis de involucrados y falta de apropiación de los futuros usuarios. Es debido a esto que un grupo de investigadores del Tecnológico de Costa Rica han propuesto un proyecto de investigación denominado Observatorio de la Construcción, cuya primera fase pretende implementar un observatorio mediante un sitio web que genere herramientas para la toma de decisiones relacionadas con el tema de la construcción y su impacto en Costa Rica. Este artículo presenta los elementos que deben considerarse para generar un observatorio de investigación y cuáles son las características que deben tener este tipo de sitios. Se describen las recomendaciones para la gestión de la información enfocada en la jerarquía de la información. Se incluye, además, un análisis de los elementos esperados en el Observatorio de la Construcción, incluyendo las actividades realizadas para sustentar los componentes a incorporar. Finalmente, se describen los componentes a considerar en el observatorio de la construcción y el trabajo futuro.

Keywords

Research observatory; data analysis; construction sector; planning; decision making.

Abstract

Considering that decision-making related to the construction sector in Costa Rica has lacked easily accessible and standardized sources of information, even though there are highly prestigious entities that generate valuable data, such as the Federated College of Engineers and Architects, Public Universities, Ministries, Autonomous Institutions, Municipalities, the National Public Information System, the National Registry, the Chamber of Construction, among others. Likewise, there is a disorderly urban development, lacking planning, generating an increase in negative impacts on the environment, increasing project execution times, with little analysis of those involved and lack of appropriation by future users. It is because of this that a group of researchers from the Technological Institute of Costa Rica have proposed a research project called the Construction Observatory, whose first phase aims to implement an observatory through a website that generates tools for decision-making related to the issue of construction and its impact on Costa Rica. This article presents the elements that should be considered to generate a research observatory and the characteristics that such sites should have. Recommendations for information management focused on the information hierarchy are described. An analysis of the elements expected in the construction observatory is also included, including the activities carried out to support the components to be incorporated. Finally, the components to be considered in the construction observatory and future work are described.

Introducción

Este artículo se enmarca en el proyecto de investigación denominado “Observatorio de la Construcción” cuyo objetivo es conceptualizar e implementar un prototipo de un observatorio de investigación en el CIVCO que gestione la información más relevante para la toma de decisiones en las áreas de infraestructura vial, planificación urbana y ordenamiento territorial, recursos hídricos, ambiente, vivienda y edificaciones. En este, se va a conceptualizar el observatorio y los componentes necesarios para su implementación.

Los observatorios consisten en la organización estandarizada y actualizada de información, la cual está disponible para la toma de decisiones de diversos interesados. El objetivo fundamental es apoyar la toma de decisiones [1]. El observatorio propuesto es un observatorio de investigación, su enfoque será académico, de forma tal que permita conocer el desarrollo del tema e identifique oportunidades de investigaciones futuras.

Por otra parte, el autor Angulo Marcial, Noel, en su artículo “¿Qué son los observatorios y cuáles son sus funciones?”, concluye: [2]

- Definición en Construcción: El concepto de observatorio en el ámbito de las ciencias sociales aún está en proceso de construcción, sin un consenso claro sobre su definición y funciones.
- Funciones Diversas: Los observatorios tienen una amplia gama de funciones, que incluyen la recopilación, análisis y difusión de información, así como la evaluación y monitoreo de fenómenos sociales, económicos o naturales.
- Gestión del Conocimiento: Los observatorios están estrechamente relacionados con la gestión del conocimiento, utilizando herramientas como buenas prácticas, lecciones aprendidas, directorios de saberes, vigilancia estratégica y redes de colaboración.
- Instrumento para la Toma de Decisiones: Los observatorios proporcionan información y análisis que son cruciales para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas.
- Espacios de Innovación y Creatividad: Se conciben como espacios abiertos a la investigación, la creatividad y la innovación, adaptándose a las necesidades específicas de las organizaciones donde operan.
- Diversidad y Dispersión Conceptual: Existe una gran diversidad y dispersión conceptual en los observatorios, con diferentes enfoques y metodologías según su campo de acción y objetivos específicos.
- Transformación de Datos en Conocimiento: Los observatorios no solo recopilan datos, sino que los transforman en información útil y conocimiento, facilitando la acción y la toma de decisiones estratégicas.
- Participación y Colaboración: Promueven la colaboración y el intercambio de conocimientos entre diferentes actores, incluyendo instituciones públicas, privadas y sociales.

Estas conclusiones resaltan la importancia de los observatorios como herramientas dinámicas para la gestión del conocimiento y la toma de decisiones en diversos contextos.

Adicional al concepto de los observatorios, esta investigación, se enmarca en una adecuada gestión de la información, considerando el concepto de la pirámide de la información, conocido también como: jerarquía de la información, pirámide del conocimiento, jerarquía del conocimiento o incluso pirámide de la sabiduría [3] y en el entorno anglosajón es frecuentemente conocido como la DIKW hierarchy o jerarquía datos-información-conocimiento-sabiduría (jerarquía DICS, en español, ver figura 1) [4].



Figura 1. La jerarquía DICS. Fuente [4]

Según Rowley, 2007. Los datos representan el nivel más básico, es la información sin tratamiento alguno. Dentro de los datos se pueden incluir: hechos o conjuntos de hechos del mundo real, estos carecen de interpretación y de contexto no tienen ninguna utilidad por sí mismos; son ejemplos de estos datos señales que recibimos de la realidad (luz, sonido, calor, etc.), símbolos que representan esa realidad (grabaciones, imágenes, textos, diagramas).

Dando sentido a los datos se llega al siguiente nivel, la información. Son los datos más relevantes extraídos de los datos básicos buscando sentido en ellos. Los datos que responden a preguntas como ¿quién?, ¿qué?, ¿cuándo?, ¿dónde? ¿cuántos?; son datos con significado.

Conectando la información se llega al conocimiento. Es la información organizada, conectada entre sí y contextualizada para generar entendimiento y aprendizaje. Es la respuesta a la pregunta ¿cómo?. Si se quiere compartir el conocimiento, se ha de compartir el entorno en el que se ha generado.

Y, si se decide reflexionar sobre ese conocimiento, se llega a la sabiduría. Es el resultado de aplicar nuestras creencias, valores y experiencias al conocimiento.

Estado del arte

Lilian Campos Soares, Edilson Ferneda y Hércules Antonio do Prado, en su artículo **OBSERVATÓRIOS: UM LEVANTAMENTO DO ESTADO DO CONHECIMENTO**, indican que los observatorios son herramientas fundamentales para la toma de decisiones, especialmente en el ámbito de las políticas públicas, debido a su capacidad para sistematizar información, generar indicadores y promover análisis críticos. También presupone que los observatorios deben ser diseñados con una estructura sólida, incluyendo recursos humanos especializados, plataformas tecnológicas eficientes y redes de colaboración interinstitucional. Además, considera que la legitimidad y eficacia de un observatorio dependen de su capacidad para producir información confiable y relevante, adaptada a las necesidades de sus usuarios, y de su habilidad para superar desafíos como la falta de recursos, datos inconsistentes y posibles interferencias políticas. [5]

En el artículo “Universal Observatory of Projects: Initial Studies” [6], los autores indican que los observatorios de proyectos ofrecen múltiples beneficios, entre los cuales destacan:

- Transparencia y acceso al conocimiento: Facilitan la transferencia y el acceso al conocimiento, promoviendo el debate, el diálogo y la reflexión sobre proyectos. También contribuyen a la transparencia de datos públicos y al combate contra la corrupción.

- Apoyo en la toma de decisiones: Actúan como herramientas de apoyo para la toma de decisiones estratégicas, ayudando a identificar escenarios, amenazas y oportunidades en un entorno de caos informacional.
- Aprendizaje y benchmarking: Permiten a los gestores aprender del éxito y fracaso de otros proyectos, además de proporcionar una base para realizar comparaciones (benchmarking) entre proyectos.
- Colaboración e interacción: Fomentan la colaboración y el intercambio de experiencias entre gerentes de proyectos, creando un ambiente de interacción global.
- Reducción de incertidumbre y mejora en la gestión de riesgos: Ayudan a disminuir las incertidumbres en los proyectos y mejoran el tratamiento de riesgos.
- Innovación y crecimiento económico: Al aprovechar los “datos abiertos”, estimulan la innovación y promueven el crecimiento económico.
- Apoyo a la investigación: Constituyen una poderosa herramienta para la investigación en proyectos, facilitando el análisis y la generación de conocimiento.

Estos beneficios hacen de los observatorios una herramienta valiosa para el manejo eficiente de proyectos y su gestión en diversos contextos. Adicionalmente, se refieren a la importancia de un sistema de gestión del conocimiento⁵. Un sistema de gestión de conocimiento se define como un conjunto de prácticas (métodos y técnicas) y herramientas (sistemas basados en tecnología de la información) destinadas a la gestión del conocimiento. Estos sistemas permiten la recopilación, almacenamiento, organización y difusión del conocimiento dentro de una organización, facilitando el acceso y el intercambio de información relevante para mejorar la toma de decisiones y la eficiencia organizacional. [6]

En esta gestión del conocimiento se han identificado varios desafíos, entre ellos: la dificultad en el intercambio de información y conocimiento, el exceso de información, la resistencia a compartir datos, el manejo de datos dispersos (en múltiples fuentes de información), la validación de la información y la madurez organizacional.

Estos desafíos resaltan la importancia de desarrollar herramientas y estrategias efectivas para gestionar el conocimiento de manera eficiente y colaborativa. [6]

Otra temática que es necesaria revisar es la fundamentación para la gestión del conocimiento, en el artículo “Knowledge Management” [7], se presentan los beneficios de una estrategia de gestión del conocimiento, los cuales incluyen:

- Resultados empresariales más rápidos: Mejora el aprendizaje organizacional y la colaboración entre los miembros del equipo, acelerando la toma de decisiones en toda la empresa.
- Eficiencia operativa: Los sistemas de gestión del conocimiento centralizan la información, reduciendo el tiempo de búsqueda y aumentando la productividad, lo que ahorra costos y tiempo.
- Mejor comunicación y colaboración: Fomenta la confianza entre los miembros del equipo, aumentando la transparencia y promoviendo una mayor comprensión y alineación de objetivos compartidos.
- Retención y satisfacción de empleados: Simplifica procesos administrativos como la incorporación y capacitación, lo que contribuye a la satisfacción y retención de empleados.

- Identificación de brechas de habilidades: Consolidar información explícita o documentar conocimientos tácitos e implícitos ayuda a identificar competencias faltantes entre equipos.
- Seguridad de datos: Permite configurar controles de visualización, permisos y niveles de seguridad para garantizar que la información se comparta solo con las personas adecuadas.
- Análisis de datos: Facilita la toma de decisiones basadas en datos mediante el uso de bases de datos, minería de datos, inteligencia artificial y aprendizaje automático.

Estos beneficios contribuyen a una mayor eficiencia, innovación y competitividad dentro de las organizaciones y puede ser utilizada en otras aplicaciones.

También, se presenta el modelo SECI (Socialización, Externalización, Combinación e Internalización) el cual fue propuesto por Nonaka y Takeuchi en 1996 y describe un proceso continuo de generación y gestión del conocimiento dentro de las organizaciones. Este modelo se basa en la interacción entre el conocimiento tácito y explícito, y se representa como una espiral de actividades de conocimiento. Este modelo es dinámico y continuo, representando un ciclo de aprendizaje organizacional que fomenta la creación, intercambio y aplicación del conocimiento. [7]

En el artículo “Gestión del conocimiento: estrategias para la adquisición, gestión y transferencia de conocimientos en las organizaciones” [8], se destaca como la gestión del conocimiento tiene un impacto significativo en la toma de decisiones dentro de las organizaciones. Al organizar, estructurar y compartir información relevante, permite que los empleados y líderes accedan a datos y conocimientos precisos y actualizados. Esto facilita decisiones informadas, basadas en evidencia y análisis, en lugar de depender únicamente de la intuición o experiencia personal.

Además, la gestión del conocimiento promueve la innovación y la resolución de problemas al proporcionar acceso a mejores prácticas, experiencias previas y lecciones aprendidas. También ayuda a evitar la pérdida de conocimiento debido a la rotación de empleados, asegurando que la información crítica esté disponible para quienes la necesiten.

En resumen, la gestión del conocimiento optimiza la capacidad de una organización para tomar decisiones estratégicas, adaptarse a cambios y mantenerse competitiva en un entorno empresarial dinámico. [8]

En el libro “Knowledge Management: Tools and Techniques” [9], el autor explora las herramientas y técnicas de gestión del conocimiento (KM), presentando más de 20 estudios de casos y análisis de expertos sobre tendencias, oportunidades y desafíos en la implementación de soluciones de KM, con un enfoque en aplicaciones prácticas y lecciones aprendidas de los éxitos y los fracasos.

Una parte importante del libro se estructura en torno al marco de las “8C” desarrollado por el autor: conectividad, contenido, comunidad, comercio, capacidad, cultura, cooperación y capital. Este marco ayuda a abordar cómo las herramientas y tecnologías de gestión del conocimiento ayudan a las empresas en áreas específicas, como el fomento del acceso de los empleados al conocimiento, contenido intuitivo, comunidades de práctica, una cultura del conocimiento, la capacidad de aprendizaje, la cooperación, los incentivos comerciales y las inversiones de capital.

Las herramientas de gestión del conocimiento en sitios web son esenciales para facilitar la organización, el intercambio y la utilización del conocimiento. Estas herramientas mejoran la colaboración, optimizan la toma de decisiones y empoderan a los usuarios al proporcionar acceso integrado a la información.

Para Ramam, 2020, los portales de gestión del conocimiento sirven como plataformas centralizadas para el intercambio de conocimientos y el acceso a recursos, fomentando la participación comunitaria y el intercambio de información. Permiten a los usuarios acceder a diversos contenidos, gestionar documentos y facilitar la concienciación social y la implementación de políticas. [10]

Por su parte, el artículo “Web Analytics and Knowledge Management” [11] describe un estudio centrado en el papel crucial de las herramientas de analítica web para mejorar la gestión del conocimiento, en particular en plataformas web. Incluye que la gestión eficaz del conocimiento en plataformas web depende en gran medida del uso de herramientas de análisis en línea y su optimización adecuada.

En cuanto al uso práctico de los observatorios, los observatorios urbanos han sido pioneros en presentar información, han permitido monitorear ciudades mediante indicadores, evaluando su progreso, apoyando la toma de decisiones y la participación ciudadana. Se han enfocado en un análisis del crecimiento urbano y los problemas asociados, tales como: impactos del crecimiento urbano, la degradación ambiental, desigualdad social, inseguridad y deficiencias en infraestructura y servicios. [12]

Algunos ejemplos son los Observatorios Urbanos de la Organización de Naciones Unidas (ONU) como el Global Urban Observatory (<https://unhabitat.org/initiative/global-urban-observatories>), enfocado en el desarrollo sostenible y la mejora de condiciones urbanas. Otros ejemplos de observatorios urbanos incluyen: casos de implementación en ciudades como Curitiba, Recife, Belo Horizonte, Vancouver, Jeddah y Mérida, mostrando cómo se adaptan a contextos locales y regionales.

Uno de los componentes importantes han sido los indicadores de sostenibilidad para monitorear el progreso hacia objetivos como los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la sostenibilidad urbana. [12]

Proyectos como el proyecto WeSenselt, realiza varias contribuciones clave, centradas principalmente en el establecimiento y desarrollo de observatorios ciudadanos para la observación eficaz de la Tierra. El proyecto ofrece una definición clara de los observatorios ciudadanos, promueve un enfoque colaborativo en el desarrollo de soluciones, priorizando el intercambio de información y experiencia entre todos los participantes, desarrollo de tecnologías altamente innovadoras, la implementación se logra mediante una combinación de colaboración abierta, aplicaciones personalizadas y portales web dedicados, la base de conocimiento compartida facilita la toma de decisiones e interactúa activamente con las comunidades y la captura de datos es innovadora, ya que utiliza sensores directamente de los ciudadanos y la colaboración abierta (crowdsourcing) de redes sociales o inteligencia colectiva. [13]

Dentro de este gran proyecto se encuentran desarrollos específicos como Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en/documentation/research-projects/wesenseit-citizen-observatory-water>). En el artículo Copernicus: the European Earth Observation programme [14], se presenta el programa Copernicus, esta es una iniciativa europea de observación de la Tierra que utiliza satélites para monitorear el medio ambiente y abordar problemas globales como el cambio climático.

El programa busca proporcionar datos y servicios que permitan enfrentar desafíos ambientales, climáticos y sociales, apoyando tanto a los responsables de políticas como a la comunidad científica y al público en general. [14]

Latinoamérica, también participa en estas iniciativas, por medio de proyectos de investigación en diferentes universidades. Además, se encuentran ejemplos de observatorios destacados como el Observatorio de la Construcción en Colombia (<https://www.observatoriodelaconstruccion.com/>), este es una herramienta clave para el análisis y la toma de decisiones en el sector de la construcción. Su función principal es recopilar, analizar y difundir información relevante sobre

la evolución del sector, incluyendo datos sobre producción, empleo, innovación y seguridad laboral, entre otros. Esta información permite a empresas, gremios, gobierno y otros actores del sector comprender mejor el panorama actual y tomar decisiones informadas. [15]

Otro ejemplo es el Observatorio de la Construcción Sostenible de Caldas (<https://construccionsostenible.camacolcaldas.com/>), este se enfoca en promover la sostenibilidad en el sector, monitoreando indicadores relacionados con el uso eficiente de recursos, la reducción de emisiones y la construcción sostenible.

En Costa Rica, existen iniciativas que generan información de gran valor para la toma de decisiones, como lo es el INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo), esta es una institución autónoma del gobierno de Costa Rica, cuya principal función es la producción y divulgación de información estadística oficial del país, dentro de sus objetivos y funciones está la realización de censos, encuestas y estudios, generación de datos oficiales e integración y utilización de información. [16]

También se cuenta con informes generales que pueden ser fuente para un posible observatorio como lo es el informe del estado de la nación, este es un estudio anual integral y riguroso sobre el desarrollo humano sostenible en Costa Rica. Es una iniciativa de los cinco rectores de las universidades públicas de Costa Rica (UCR, UNA, TEC, UNED, UTN).

Su objetivo principal es proporcionar un diagnóstico profundo y objetivo sobre la realidad nacional, abarcando diversas dimensiones del desarrollo para fomentar la reflexión y el debate público, y servir como base para la toma de decisiones informadas. [17]

En el sector construcción el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) de Costa Rica genera una serie de datos estadísticos del sector, pero no es un observatorio de investigación. [18]

Materiales y métodos

La conceptualización de este observatorio de la construcción se siguieron las recomendaciones con ciertos ajustes, de las fases y actividades propuestas por los autores Louis Rosenfeld, Peter Morville & Jorge Arango, en su libro Arquitectura de la Información [19].

Según dicha metodología, tenemos las etapas mostradas en la figura 2, de las cuales en este artículo se describen las primeras dos:



Figura 2. Metodología para generación de un sitio web.

Fase 1: Investigación.

Entre las principales actividades de la investigación, se encuentran las siguientes:

1. Análisis de contexto: Define y enmarca el alcance del proyecto.
2. Análisis de contenido: Para entender qué contenidos vamos a tener en el sitio.
3. Análisis de personas: Para comprender quiénes son y qué quieren los usuarios.
4. Análisis de competencia: Para tomar buenas prácticas, casos de éxito y elementos a evitar.

En los cuadros 1 y 2, se resumen los criterios aplicados para el análisis de los sitios web.

Cuadro 1. Criterios para el análisis de los sitios web – Análisis de contexto.

Criterio	Descripción
Problema	<p>La toma de decisiones en Costa Rica ha carecido de fuentes de información confiables, actualizadas y estandarizadas. Esto afecta la eficiencia en áreas clave como infraestructura vial, planificación urbana, recursos hídricos y vivienda. Existen datos, pero pocas veces se articulan para la toma de decisiones.</p>
Propuesta de solución	<p>El Observatorio de Investigación en CIVCO tiene como objetivo principal crear una herramienta fundamental para la toma de decisiones informadas en Costa Rica, particularmente en los sectores de infraestructura vial, planificación urbana y ordenamiento territorial, recursos hídricos y ambiente, y vivienda y edificaciones. El observatorio permitirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recopilar, almacenar y gestionar datos relevantes de diversas fuentes. - Analizar los datos para identificar tendencias y patrones. - Visualizar los datos de manera clara y accesible. - Compartir los resultados del análisis con los usuarios. - Facilitar la colaboración entre diferentes actores del sector. <p>Este observatorio gestionará información propia y de otras fuentes.</p>
Áreas de negocio involucradas	<p>El observatorio afectará las áreas de infraestructura vial, planificación urbana y ordenamiento territorial, recursos hídricos y ambiente, y edificaciones y vivienda. Estos sectores involucran a tomadores de decisiones tanto del sector público como privado, incluyendo gobierno central, gobiernos locales, instituciones educativas y empresas privadas.</p>
Importancia de la solución	<p>Se proporcionarán datos estandarizados de fuentes confiables para mejorar la toma de decisiones en el sector construcción y otros campos relacionados. Ayudará a identificar tendencias y problemas y proporcionará una base para desarrollar soluciones innovadoras.</p>
Requerimientos funcionales	<ul style="list-style-type: none"> - Recopilación de datos de diversas fuentes. - Almacenamiento y gestión de datos segura y eficiente. - Análisis de datos para identificar tendencias y patrones. - Visualización de datos para facilitar la comprensión de la información. - Generación de informes y otros productos de conocimiento. - Búsqueda y acceso a la información de forma sencilla e intuitiva. - Mecanismos de colaboración entre usuarios.
Requerimientos no funcionales	<ul style="list-style-type: none"> - Escalabilidad para adaptarse a un volumen creciente de datos. - Seguridad para proteger la información confidencial. - Disponibilidad para garantizar el acceso a la información en todo momento. - Usabilidad para facilitar el uso de la plataforma por parte de usuarios con diferentes niveles de conocimiento técnico. - Accesibilidad para personas con discapacidades.
¿Con qué contamos?	<ul style="list-style-type: none"> - Colaboración del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y otras instituciones académicas y gubernamentales. - Conocimiento previo de proyectos de observatorios y ejemplos similares. - Datos existentes de otros estudios y proyectos de la universidad. - Recursos financieros y humanos.
¿Qué nos falta?	<ul style="list-style-type: none"> - Plataforma tecnológica especializada para la gestión y análisis de datos. - Acuerdos con las fuentes de datos para acceder a la información de forma regular. - Recursos humanos especializados en IA, análisis de datos y visualización de datos. - Estrategia de comunicación para dar a conocer el observatorio y sus beneficios.
Riesgos	<ul style="list-style-type: none"> - Dificultades para acceder a datos actualizados y confiables. - Problemas de interoperabilidad entre diferentes fuentes de datos. - Posibles retrasos debido a desafíos tecnológicos o de recursos.
Retos	<ul style="list-style-type: none"> - Integrar y estructurar datos de diversas fuentes de manera coherente. - Asegurar la sostenibilidad y continuidad del observatorio a largo plazo. - Garantizar la seguridad y confidencialidad de los datos. - Generar interés y participación de los usuarios para mantener el observatorio relevante.

Cuadro 2. Criterios para el análisis de los sitios web – Análisis de usuarios.

Usuario	Tipo / área de procedencia	Tareas / objetivos	Necesidades / motivaciones	Patrones / comportamientos	Contenido	Forma de acceso al contenido
Estudiante	Universidad	Obtener información para trabajos académicos	Información fácil y rápida de encontrar Información verás	Búsqueda rápida, fácil de encontrar, no toma mucho tiempo para averiguar	-Datos de infraestructura -Informes técnicos. -Análisis de tendencias.	Computadora, dispositivos móviles
Estudiante de arquitectura	Universidad	Aprender sobre diseño arquitectónico	- Inspiración creativa -Conocimiento técnico - Referencias históricas	- Investigación de estilos arquitectónicos - Uso de software de diseño - Visitas a obras emblemáticas	- Libros de arquitectura - Documentales - Visitas a museos	Computadora, dispositivos móviles
Estudiante de ingeniería en construcción o civil	Universidad	Aprender conceptos de ingeniería, análisis de proyectos	- Información técnica para estudios - Ejemplos para trabajos académicos	Uso de software de ingeniería, búsqueda de datos para estudios	- Planos técnicos. -Informes. -Datos de infraestructura.	Computadora, dispositivos móviles
Profesor universitario	Universidad	Preparar materiales de enseñanza	- Información relevante para sus clases - Actualización constante	- Búsqueda específica - Revisión de fuentes confiables	-Investigaciones académicas. - Libros de texto - Recursos multimedia	Computadora
Investigador académico	Universidad	Realizar investigaciones y publicaciones	- Acceso a datos primarios y secundarios - Herramientas de análisis - Referencias actualizadas	- Búsqueda exhaustiva - Análisis profundo	- Bases de datos académicas - Repositorios científicos - Revistas especializadas	Computadora
Administrador de infraestructura vial	Gobierno	Planificar mantenimiento y mejoras viales	- Datos precisos sobre el estado de las carreteras - Información sobre proyectos anteriores	- Monitoreo constante - Evaluación de tendencias	- Informes de inspección vial - Datos de tráfico - Historial de obras	Computadora
Arquitecto	Empresa consultora	Diseñar edificaciones sostenibles	- Inspiración creativa - Normativas de construcción - Soluciones innovadoras	- Investigación de tendencias arquitectónicas - Uso de software de diseño - Análisis de casos de éxito	- Revistas de arquitectura - Blogs especializados - Catálogos de materiales	Computadora
Ingeniero civil	Empresa de ingeniería	Planificar y supervisar proyectos de infraestructura	- Datos técnicos - Cumplimiento de normas - Eficiencia en costos	- Uso de software de modelado - Análisis de viabilidad - Evaluación de riesgos	- Planos de ingeniería - Informes de inspección - Estudios geotécnicos	Computadora

Usuario	Tipo / área de procedencia	Tareas / objetivos	Necesidades / motivaciones	Patrones / comportamientos	Contenido	Forma de acceso al contenido
Ecólogo o similar	Organización ambiental	Evaluar impacto ambiental de proyectos	- Datos sobre biodiversidad - Sostenibilidad - Conservación	- Análisis de ecosistemas - Modelos de impacto - Investigación de especies	- Informes de impacto ambiental - Estudios de fauna y flora - Mapas de zonas sensibles	Computadora
Urbanista	Consultoría o gobierno	Desarrollar planes de movilidad urbana y diseño de planes de desarrollo urbano	- Datos de tráfico y demográficos - Sostenibilidad - Eficiencia en transporte - Tendencias	- Análisis de flujos de tráfico y patrones de crecimiento - Modelos de movilidad - Evaluación de opciones de transporte y de impacto ambiental	- Estudios de movilidad - Informes de congestión - Mapas geoespaciales - Planes maestros de desarrollo urbano	Computadora
Sociólogo	Universidad	Investigación social	- Información sobre impacto social - Análisis de datos demográficos.	Análisis de tendencias sociales, investigación sobre impacto de proyectos.	- Datos demográficos. - Informes sobre impacto social. - Análisis de tendencias	Computadora y dispositivos móviles.

Al final de este análisis de personas, se realiza una agrupación de necesidades y características similares, determinando que se van a tener 2 tipos de personas o actores en los que todos los anteriores se pueden resumir, y se añade su personificación para un mejor entendimiento de los usuarios (ver figura 3).

El estudiante



Esteban Perez, 20
Estudiante Universitario

Esteban es un estudiante de Ing. en Construcción. Este semestre está llevando bloque completo. Todas las semanas debe entregar avances de proyectos para 5 cursos diferentes, por lo que siempre está trabajando en su laptop vieja y confiable, o incluso desde su celular. Cuando acaba con un avance, se pone a buscar información para el próximo. Desea llegar a ser un buen Ing. en tanto de todos los avances e innovaciones en su campo :)

Características

- Proyectos de corto plazo
- Investigación superficial, pocas fuentes
- Pocas visitas a un mismo documento
- Investiga una mayor diversidad de temas.

Necesidades

- Encontrar información al día y relevante para sus tareas
- Hacer trabajos para la universidad, usualmente en equipo
- Aprender sobre su campo de estudio

Escenarios

- Buscar información general sobre un tema
- Compartir una fuente de información con sus compañeros de equipo
- Conseguir la referencia bibliográfica de una fuente que usó
- Enterarse de desarrollos recientes en el campo de la construcción



Camila Sánchez, 45
Profesora Universitaria

Camila es una profesora de Arquitectura y Urbanismo quien, además de dar clases, está involucrada en proyectos de investigación y extensión. Al investigar, busca la mayor cantidad de información fidedigna y actualizada posible para informar la investigación en la que está trabajando en ese momento. Es una persona ordenada y organizada. Le gusta compartirle a sus estudiantes avances en el campo y estudios interesantes.

Características

- Proyectos de largo plazo
- Investigación profunda y exhaustiva
- Le pone mayor atención a la fiabilidad de las fuentes
- Consulta reiterada a documentos

Necesidades

- Producir investigación y conocimiento en su campo de estudio
- Tener sus fuentes organizadas para que sean de fácil acceso
- Comprobar que la fuente que está leyendo es confiable

Escenarios

- Explorar toda la literatura y estudios sobre un tema en particular
- Compartir un estudio nuevo interesante con sus alumnos
- Encontrar las fuentes que consultó hace 3 días

Figura 3. Criterios para el análisis de los sitios web – Análisis de personas.

Posteriormente, se aplicó un instrumento para cada uno de los 40 sitios, definiendo el criterio, subcriterio de exclusión o inclusión, esto como parte del análisis competitivo (ver cuadro 3).

Cuadro 3. Criterios para el análisis de los sitios web – Análisis de competencia.

Proposición de valor	Proposición de valor	Cómo se describe el sitio por sí mismo, qué vende/ofrece	
Personas / Usuarios	Información para estudiantes	¿Tiene información clara para este tipo de personas?	Si no cumple estos criterios o no son afines al tema, no se continúa con el análisis para ese sujeto de investigación
	Información para docentes/investigadores		
	Información para empresas externas	Hay etiquetas que directamente sugieran información para esta persona	
	Información para empresas del gobierno	Desde la perspectiva de esta persona/rol, me siento cómodo buscando información?	
Ámbito de aplicación	Ámbito de aplicación	Sobre qué temas es este sujeto de investigación: infraestructura vial, planificación urbana, recursos hídricos y vivienda.	

Como parte del análisis de competencia, se realiza un análisis de mínimos comunes, con el fin de determinar los principales elementos por página, que se repiten en todos los sitios analizados, para preparar la propuesta inicial de la fase de la estrategia. Las páginas analizadas fueron las siguientes, en el cuadro 4 se puede observar un ejemplo de dicho análisis:

1. Página principal
2. Sobre nosotros
3. Mapa del sitio
4. Repositorios de información
5. Página de tema y tipo de recurso
6. Prevista de la información
7. Detalle de la información
8. Reportes/documentos/informes

Cuadro 4. Criterios para el análisis de los sitios web – Ejemplo de mínimos comunes.

Página del sitio	Elementos de la página	Cantidad de sitios que lo usan
Prevista de la información	Imagen	12
	Categoría/Palabras clave	10
	Título	21
	Fecha	10
	Enlace de descarga	9
	Descripción	9
	Autor/a	7

Finalmente, respecto al análisis de contenido, se tiene un potencial muy amplio de todo lo que se puede incluir, pero de forma inicial se trabajará con:

1. Un repositorio de información que contendrá los proyectos de graduación de estudiantes considerados de impacto, tanto de la carrera de Ingeniería en Construcción como de los programas de posgrado de la misma escuela.
2. Cursos que se desarrollen, así como talleres o charlas.
3. Indicadores o desbordadas.

Fase 2: Estrategia.

Con respecto a la segunda fase de la metodología “Estrategia” [5] se tienen las siguientes actividades:

1. Análisis y toma de decisiones con respecto a lo obtenido de la fase anterior (investigación).
2. Definición de la estrategia, que radica en el diseño del mapa del sitio (estructura) así como el diseño del “cascarón” del sitio, incorporando las buenas prácticas de experiencia de usuario (UX) y patrones de diseño. Por su parte, también se desarrolla la estrategia técnica, donde se analizó principalmente la infraestructura en dónde se debería hospedar el observatorio.

Por lo tanto, planteó una propuesta inicial con los componentes que deberían considerarse en un observatorio, considerando elementos básicos, así como las buenas prácticas identificadas en los sitios analizados. Esta propuesta fue discutida en un grupo focal, compuesto por profesores y estudiantes de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ver figura 4).

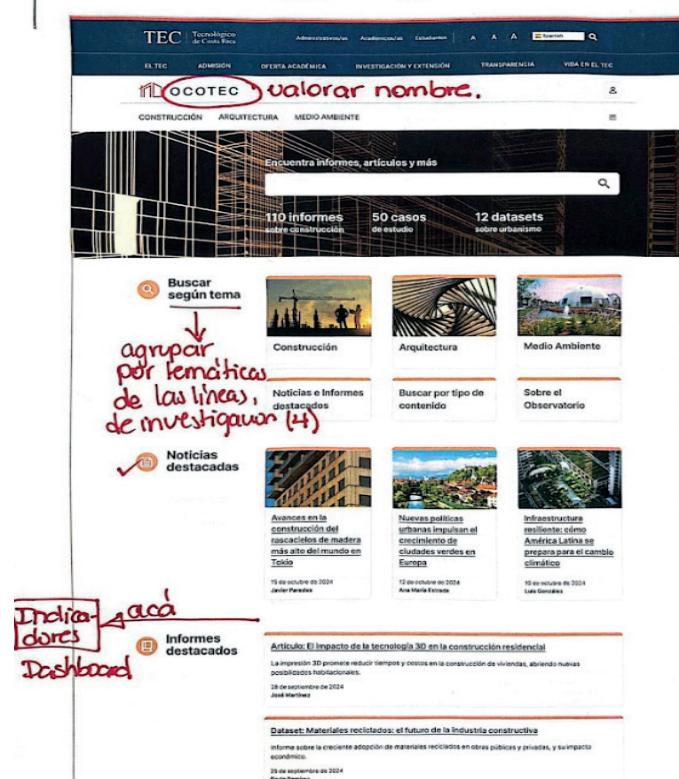


Figura 4. Ejemplo propuesta base con comentarios durante el grupo focal.

Relacionado a la estrategia técnica, cuyo principal desafío radica en la implementación de una página web para el observatorio de la construcción es elegir dónde situar el proyecto. Dentro de las opciones posibles se encuentran la página web institucional del TEC o una plataforma externa contratada. El principal desafío consiste en hallar una alternativa que permita el control, un costo adecuado, soporte, mantenimiento y escalabilidad, por lo que se realiza un análisis de proveedores externos y entrevistas con la persona encargada de la Web Institucional.

Resultados

Una vez aplicada la metodología, se identificaron los componentes esenciales para un observatorio de investigación, estos son:

- Un repositorio de información relevante, categorizada por tema.
- Información de proyectos de investigación y extensión asociados a la temática.
- Proyectos piloto por desarrollar en conjunto con otros actores
- Cursos online desarrollados
- Indicadores para toma de decisiones por área temática

El repositorio de información se nutrirá de proyectos de graduación de estudiantes considerados de impacto, tanto de la carrera de Ingeniería en Construcción como de los programas de posgrado de la Escuela de Ingeniería en Construcción. Estos documentos en conjunto con los proyectos de investigación y extensión contribuirán a la pirámide de la información proporcionando datos e información.

Los cursos que se desarrollen, así como talleres o charlas aportarán al conocimiento. El desarrollo de indicadores contribuirá al conocimiento y el análisis de los indicadores contribuirá a la sabiduría. Este último punto permitirá hacer análisis integrales que sean base para la toma de decisiones.

En la figura 5 se muestra de forma gráfica la conceptualización del observatorio de la construcción, considerando los elementos necesarios para un observatorio de investigación.



Figura 5. Conceptualización general del observatorio.

El componente modular y diferenciador serán los indicadores y el análisis de datos que se genere, para el análisis se utilizarán diferentes técnicas o procesos que permitan extraer información valiosa para generar conocimiento o sabiduría. Los análisis estarán enfocados en identificar patrones, tendencias, relaciones que permitan tomar decisiones informadas.

Las técnicas por utilizar dependerán del tipo de datos y el objetivo de cada análisis, podrían ser descriptivas, exploratorias, inferenciales, predictivas o bien una combinación de estas.

Otro elemento que se debió analizar se relaciona con la plataforma o software, para este análisis se aplicó una matriz comparativa que consideró: control y seguridad, costo, soporte técnico, escalabilidad, personalización, mantenimiento, integración con otros sistemas, tiempo de implementación. De este análisis, se ha decidido albergar el observatorio en el sitio web del TEC, las principales razones radican en:

- a. Actualmente, el CIVCO no cuenta con recursos o presupuesto fijos para Tecnologías de Información (TI) mientras que la web Institucional tiene como objetivo brindar este tipo de servicios.
- b. La Web Institucional garantiza soporte, mantenimiento, escalabilidad y capacitación sin requerir presupuesto adicional por parte del CIVCO.
- c. La Web Institucional permite la integración con otras tecnologías, permitiendo añadir en el futuro dashboards de inteligencia de negocios, almacenamiento externo, entre otros.

Por su parte, como punto débil de esta opción, es que la web Institucional atiende a todo el TEC y sus tiempos de respuesta dependen de la demanda del servicio actual. Sin embargo, este tiempo de espera podría ser menor que iniciar el desarrollo desde cero de un sitio web que muestre la información requerida del observatorio, pero además de su “back-office” para permitir la gestión de esa información sin requerir conocimientos de desarrollo de software.

Conclusiones y trabajo futuro

La investigación realizada ha permitido reafirmar la importancia del análisis de datos de forma sistemática y estructurada previo al desarrollo de un sistema con el fin de disminuir costos de implementación, ya que el diseño del sitio web debe seguir los pasos recomendados, el cual incluye un exhaustivo análisis de requerimientos.

El tiempo invertido en la planificación del sitio para un observatorio va a ser un factor crítico de éxito, ya que permitirá enfocarse en lo que realmente se requiere.

Como trabajo futuro se debe implementar el diseño del observatorio como un sitio dentro de la página del Tecnológico de Costa Rica y se deben seguir los pasos recomendados para el diseño de un sitio web; además de considerar las necesidades para el mantenimiento y operación del observatorio.

Referencias

- [1] Prieto, Rodrigo, 2003, "Observatorios en internet", Servicio de observación sobre internet, boletín semanal, núm. 240.
- [2] Angulo Marcial Noel. ¿Qué son los observatorios y cuáles son sus funciones?. Innovación Educativa. 2009, 9(47), 5-17. ISSN: 1665-2673. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179414895002>
- [3] Rowley, Jennifer (2007). «The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy». Journal of Information Science 33 (2): 163-180. doi:10.1177/0165551506070706.
- [4] García-Marco, Francisco-Javier. "La pirámide de la información revisitada: enriqueciendo el modelo desde la ciencia cognitiva". El profesional de la información, 2011, enero-febrero, v. 20, n. 1, pp. 11-24. DOI: 10.3145/epi.2011.ene.02.
- [5] Soares, Lilian Campos; Ferneda, Edilson; Prado, Hércules Antonio do. *Observatórios: um levantamento do estado do conhecimento*. // Brazilian Journal of Information Studies: Research Trends. 12:3 (2018) p.86-p.110. ISSN 1981-1640. <https://doi.org/10.36311/1981-1640.2018.V12N3.08.P86>.
- [6] J. K. M. Vieira, J. L. P. Barbosa, I. H. de Farias and H. P. de Moura, "Universal Observatory of Projects: Initial Studies," 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Seville, Spain, 2020, pp. 1-6, doi: 10.23919/CISTI49556.2020.9141001.
- [7] Saini, P., Jain, R., & Jain, N. (2023). Knowledge Management. *International Journal For Science Technology And Engineering*, 11(1), 1786–1788. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.48025>.
- [8] Ramos Castillo, M. A., García Álvarez, A. D., Martínez Prats, G., & Vázquez Vidal, V. (2024). Knowledge management: strategies for the acquisition, management and transfer of knowledge in organizations. *Publicaciones e Investigacion*, 18(1). <https://doi.org/10.22490/25394088.7588>.
- [9] Rao, M. (n.d.). *Knowledge Management: Tools and Techniques*. <https://doi.org/10.4324/9780080478869>.
- [10] Rahman, H. (2021). *Knowledge Management Portals for Empowering General Public and Societies* (pp. 243–270). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7844-5.CH012>.
- [11] The Impact of Web Analytics Tools on Knowledge Management. (n.d.). *Procedia Computer Science*. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.335>.
- [12] Ferreira, A., Silva, L. T., & Ramos, R. A. R. (2012). *Urban observatories, tools for monitoring cities*. <https://repository.sdm.uminho.pt/handle/1822/22916>.
- [13] Mazumdar, S., Lanfranchi, V., Ireson, N., Wrigley, S. N., Bagnasco, C., Wehn, U., McDonagh, R., Ferri, M., McCarthy, S., Huwald, H., & Ciravegna, F. (2016). *Citizens observatories for effective Earth observations: the WeSenseIt Approach*. <https://eprints.whiterose.ac.uk/110426/>.
- [14] Jutz, S., & Milagro-Pérez, M. P. (2020). *Copernicus: the European Earth Observation programme*. 56, 1. <https://doi.org/10.4995/RAET.2020.14346>.
- [15] Instituto Nacional de Estadística y Censo. (s.f.). *Estadísticas nacionales*. <https://www.inec.cr>.
- [16] Programa Estado de la Nación. (s.f.). *Informes anuales*. <https://estadonacion.or.cr/>.
- [17] Colegio de Ingenieros y Arquitectos. (s.f.). *Estadísticas y estudios*. <https://cfia.or.cr/site/estadisticas-e-informes-tecnicos/>.

[19] A Rosenfeld, L. & A Arango, J. Information Architecture: For the Web and Beyond. (2015). O'Reilly Media.
<https://books.google.co.cr/books?id=dZaJCgAAQBAJ> .

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Utilizamos la herramienta de inteligencia artificial Scispace para revisión bibliográfica y generar un estado del arte, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de los contenidos.