

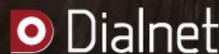


TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Julio - Setiembre 2022
Volumen 35-3
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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.freepik.com/>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 35-3, Julio-Setiembre
2022- Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



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



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



www.latindex.unam.mx



<http://www.scielo.org/>



dialnet.unirioja.es



<http://www.amelica.org>



<https://redib.org>



<http://www.doaj.org/>

TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Estudio comparativo mediante diferentes métodos para el cálculo de tensiones de contacto en engranajes rectos Comparative study using different methods for calculating contact tensions in spur gears <i>Yoañ Manuel Ramos-Botello, Mario Luís Fernández-Tamayo, Jorge Alexander Bosch-Cabrera, Santiago Amaury Santana-Reyes, René Misael Arias-Hidalgo</i>	3
Inmunoterapia activa con anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de páncreas Active immunotherapy with monoclonal antibodies as a therapeutic option for the treatment of pancreatic cancer <i>Arisai Barquero-Solano, Gloriana Guevara-Saborío, Jeison Montero-Rivera, Lázaro Vargas-Sandoval, Luis Daniel Velásquez-Alfaro, Juan José Mora-Román</i>	16
Características y enfoques de los proyectos sobre cambio climático en Costa Rica de 2011 a 2022 Characterizations and approaches of climate change in Costa Rica from 2011 to 2022 <i>Melissa Marín-Cabrera</i>	35
Optimización del punto de operación de un impulsor axial sin eje central en flujo sanguíneo Optimization of the operating point of an axial impeller without central shaft in blood flow <i>Johanna Muñoz-Pérez</i>	48
Manejo reproductivo en hatos bufalinos Reproductive mananagement in buffalo herds <i>David Campos-Jiménez, Esteban Garro-Monge, Valery Jiménez-Benavides, Pablo Mora-Gamboá, Mónica Madrigal-Valverde</i>	60
Perfilado de rendimiento de FPS para múltiples arquitecturas computacionales usando el algoritmo de reducción de neblina DCP FPS performance profiling for multiple computational architectures using the DCP dehazing algorithm <i>Allan Francisco Navarro-Brenes, Luis Alberto Chavarría-Zamora</i>	73

Variabilidad transversal de características dimensionales de traqueidas en <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> de plantaciones de 25 años de edad	
Radial variability of quantitative features of tracheids in <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> from 25 years old plantations	
<i>Gabrialy Márquez-Carrero., Styles W. Valero, Williams J. León-Hernández, Ivania J. Gutiérrez-Gotera, Julio C. Maldonado-Rangel</i>	82
Diseño e implementación de un sistema automático de control para la regulación y monitoreo de las condiciones internas del secador solar térmico forzado híbrido	
Design and implementation of an automatic control system for the regulation and monitoring of the internal conditions of the forced hybrid thermal solar dryer	
<i>Pablo José Molina-Hernández, Guillermo Castro-Badilla, Tomás de Jesús Guzmán-Hernández</i>	94
Comunidades de macroinvertebrados bentónicos como bioindicador de calidad de agua en un sector del río Chotano, Perú	
Benthic macroinvertebrates community as quality bioindicator of water in a sector of the Chotano river, Perú	
<i>Celso Nazario Purihuamán-Leonardo, Eberth Frank Sánchez-Bustamante</i>	117
Estudio de la eficiencia técnica en escuelas de campo de Nicaragua	
Study of technical efficiency in field schools from Nicaragua	
<i>Carlos Zúñiga-González, Luis Moreno-Mayorga, Conrado Quiroz-Medina</i>	128
Diseño de un biorreactor tipo tanque agitado para el crecimiento de <i>Rhodococcus opacus</i>	
Design of a stirred tank type bioreactor for the growth of <i>Rhodococcus opacus</i>	
<i>Pablo Bogantes-Portuguez</i>	141
Síntomas del amachamiento del frijol común	
Symptoms of common bean “amachamiento”	
<i>Rubén Calderón-Cerdas, Carlos Manuel Araya-Fernández</i>	158
Consideraciones geográficas para vuelos con Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia en Costa Rica	
Geographic considerations for flights with Remotely Piloted Aircraft Systems in Costa Rica	
<i>Ramón Masis-Campos, Jonnathan Reyes-Chaves, Melvin Lizano-Araya</i>	167
Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo	
Main wind tunnels in wind energy research around the world	
<i>Emanuel Fallas-Hernández, José Alejandro Padilla-Barrientos, Gustavo Richmond-Navarro, Maximino Jiménez-Ceciliano</i>	178
La economía circular como alternativa hacia un nuevo modelo para la actividad industrial sustentable	
The circular economy as an alternative towards a new model for sustainable industrial activity	
<i>Mariana Marcelino-Aranda, Alberto Macías Alcibar, María Concepción Martínez-Rodríguez, Alejandro D. Camacho</i>	195

Estudio comparativo mediante diferentes métodos para el cálculo de tensiones de contacto en engranajes rectos

Comparative study using different methods for calculating contact tensions in spur gears

Yoan Manuel Ramos-Botello¹, Mario Luís Fernández-Tamayo²,
Jorge Alexander Bosch-Cabrera³, Santiago Amaury Santana-Reyes⁴,
René Misael Arias-Hidalgo⁵

Fecha de recepción: 10 de junio de 2021
Fecha de aprobación: 6 de octubre de 2021

Ramos-Botello, Y.M; Fernández-Tamayo, M.L; Bosch-Cabrera, J.A; Santana-Reyes, S.A; Arias-Hidalgo, R.M. Estudio comparativo mediante diferentes métodos para el cálculo de tensiones de contacto en engranajes rectos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 3-15.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5611>

- 1 Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Mecánica. Cuba. Correo electrónico: yramosb@udg.co.cu
 <https://orcid.org/0000-0001-7838-5981>
- 2 Centro de Investigación del Transporte. Cuba. Correo electrónico: cid4@reduim.cu
 <https://orcid.org/0000-0002-6872-8757>
- 3 Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Mecánica. Cuba. Correo electrónico: jbosch@udg.co.cu
 <https://orcid.org/0000-0002-9475-9936>
- 4 Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Mecánica. Cuba. Correo electrónico: ssantanar@udg.co.cu
 <https://orcid.org/0000-0002-0059-0990>
- 5 Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Mecánica. Cuba. Correo electrónico: ariash@udg.co.cu
 <https://orcid.org/0000-0002-9661-1214>

Palabras clave

Engranaje; elementos finitos; fatiga superficial; criterio de Hertz; tensiones de contacto.

Resumen

Una de las causas de fallo que con mayor frecuencia se presentan en las transmisiones por engranajes, es la conocida como fatiga superficial o picadura. Para predecir el comportamiento del material frente a este fenómeno, las normas internacionales de diseño, Asociación Americana de Manufactura de Engranajes (AGMA) y la Organización Internacional para la Normalización (ISO), formulan modelos basados en la distribución de presiones de Hertz, para el contacto entre sólidos. En esta investigación se comparan las tensiones de contacto en engranajes cilíndricos de dientes rectos, de acuerdo a lo planteado por las normas antes mencionadas, el criterio de Hertz y mediante el método de elementos finitos. Los modelos en tres dimensiones fueron obtenidos con la ayuda de un paquete de diseño asistido por computadora (CAD), donde se tuvieron en cuenta las especificaciones de cada norma. Como una de las variantes de cálculo a comparar, es el resultado obtenido por simulación numérica, solo se tendrán en cuenta los factores que dependan de la geometría del diente y el material del mismo. Los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente, donde se determinó la efectividad del método de elementos finitos para este tipo de cálculo, además, estos se asemejan más a los obtenidos por método de Hertz que es la teoría que sirve como base a las normas antes mencionadas.

Keywords

Gear; finite elements; surface fatigue; Hertz criteria; contact stresses.

Abstract

One of the most common causes of failure in gear drives is known as surface fatigue or pitting. To predict the behaviour of the material against this phenomenon, international design standards, the American Gear Manufacturing Association (AGMA) and the International Organization for Standardization (ISO), formulate models based on the Hertz pressure distribution, for the contact between solids. In this research, contact stresses are compared in straight-tooth cylindrical gears, in accordance with the provisions of the aforementioned standards, the Hertz criterion and through the finite element method.

The three-dimensional models were obtained with the help of a computer-aided design (CAD) package, where the specifications of each standard were taken into account. As one of the calculation variants to compare, it is the result obtained by numerical simulation, only the factors that depend of the tooth geometry and its material will be taken into account. The results obtained were analyzed statistically, where the effectiveness of the finite element method for this type of calculation was determined, in addition, these are more similar to those obtained by the Hertz method, which is the theory that serves as the basis for the aforementioned standards.

Introducción

Las fallas principales en la superficie de los dientes de los engranajes, están asociadas a la fatiga, como consecuencia de la acción repetida de carga y descarga de dichos dientes durante el funcionamiento del par engranado. El estudio a fatiga no es una ciencia exacta y absoluta, de la cual pueden obtenerse resultados exactos, sino que es un estudio aproximado y relativo [1, 2]. En los engranes este fenómeno no se ha comprendido por completo y es evidente que el estudio de este problema es mucho más complejo que el análisis de falla por flexión

[3]. Los métodos tradicionales de cálculo basados en criterios simplificados, no dan resultados adecuados en el análisis de situaciones complicadas, de manera que deben de ser aceptadas suposiciones y simplificaciones para que las soluciones pueden ser obtenidas mediante el cálculo manual. El desarrollo de procedimientos establecidos para el diseño de engranajes ha permitido la elaboración de un conjunto de normas, entre las que se destacan la *American Gear Manufacturers Association* (AGMA) y la *International Organization for Standardization* (ISO), aplicables a la construcción, control, explotación y cálculo de la capacidad de carga de engranajes. Para predecir el comportamiento del material en la zona de contacto entre los dientes, dichas normas formulan modelos basados en la distribución de presiones de contacto de Hertz para el contacto entre sólidos [4]. En engranes cilíndricos de diente rectos, los puntos donde las normas antes mencionadas localizan las tensiones máximas de contacto no coinciden. Mientras la ISO considera como punto crítico el punto de rodadura y la AGMA toma el punto de contacto único inferior del piñón, que no coincide con el de rodadura más que en casos auténticamente singulares. Aunque ambas normas se basan en el modelo de Hertz, ninguna de estas coincide con el punto teórico de máxima presión superficial que predice dicho modelo [5, 6]. Por otra parte, el Método de los Elementos Finitos (MEF), parece ser una alternativa más para el cálculo de las tensiones de contacto en engranajes. No obstante, presenta limitaciones, pues muchos de los factores tenidos en cuenta de forma analítica, en el MEF no se pueden considerar. Esta investigación tiene como objetivo comparar las tensiones de contacto en engranajes cilíndricos de dientes rectos, de acuerdo a lo planteado por las normas antes mencionadas, por el criterio de Hertz y los resultados obtenidos mediante elementos finitos. Para ello se analizan diez casos de estudio y los resultados se analizarán estadísticamente. Se calcularán los valores de tensiones en el punto de contacto a partir de diferentes métodos:

- Tensiones de Hertz según los parámetros geométricos del engrane establecido por la norma ISO (ISO Hertz).
- Tensiones de Hertz según los parámetros geométricos del engrane establecido por la norma AGMA (AGMA Hertz).
- Tensiones de contacto a partir de la ISO (ISO).
- Tensiones de contacto a partir de la AGMA (AGMA).
- Tensiones de contacto a partir del MEF según lo planteado por la norma ISO (ISO MEF).
- Tensiones de contacto a partir del MEF según lo planteado por la norma AGMA (AGMA MEF).

Materiales y métodos

Cálculo analítico de los esfuerzos de contacto

El fundamento del cálculo analítico del esfuerzo de contacto se basa en la denominada presión de Hertz que estudia el fenómeno de los esfuerzos que surgen entre dos esferas en contacto bajo una fuerza aplicada. Posteriormente se particularizó dicha teoría para otros casos como el del contacto entre dos cilindros de una longitud determinada. Es en esta teoría en la que se basan los estudios desarrollados por las normas ISO y AGMA para el cálculo de las tensiones de contacto en los flancos de los dientes de los engranes [7, 8].

Esfuerzo de contacto en dos cilindros según Hertz

Cuando dos cilindros macizos de diámetros D_1 y D_2 se presionan entre sí bajo la acción de una fuerza (F_n), se obtiene un área de contacto de forma rectangular igual a dos veces el semiancho del área de contacto (B), la cual se forma por la deformación de las partes en contacto (figura

1). Esta variable se determina según la ecuación (1). Teniendo en cuenta esta variable, la fuerza y la longitud de contacto (l_c), es posible determinar la presión máxima de contacto ($P_{m\acute{a}x}$) en la zona deformada según se plantea en la ecuación (2) [9, 10].

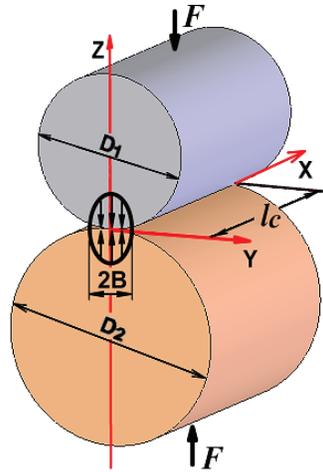


Figura 1. Cilindros en contacto bajo la acción de la fuerza F .

$$B = \sqrt{\frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot l_c} \cdot \frac{\frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2}}{\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}}} \quad (1)$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{2 \cdot F_n}{\pi \cdot B \cdot l_c} \quad (2)$$

Donde μ_1 , μ_2 , E_1 , E_2 corresponden a los coeficientes de Poisson y módulos elásticos respectivamente de los materiales.

Bajo estas condiciones se producen tensiones en las tres direcciones principales ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), pero para este estudio se tomará solo el valor máximo que es cuando una de estas coincide con el valor de $P_{m\acute{a}x}$ (ecuación 3).

$$\sigma_z = -P_{m\acute{a}x} \quad (3)$$

El punto de contacto entre los engranajes de diente recto se puede considerar como la zona de contacto entre dos cilindros. En el caso de dichos engranajes, surgen la fuerza normal (F_n), la cual se descompone en la radial (F_r), tangencial (F_t) (figura 2). En el caso de la teoría de Hertz la fuerza a utilizar es F_n mientras las normas ISO y AGMA para el cálculo de los esfuerzos de contacto la fuerza utilizada es F_t [11, 12].

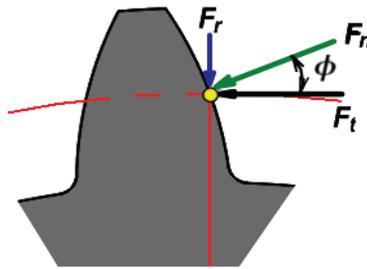


Figura 2. Fuerzas sobre un diente del engranaje.

Esfuerzos de contacto según las normas ISO y AGMA

Debido a que en la simulación por elementos finitos solo se trabaja con un modelo geométrico ideal, (sin errores de fabricación y montaje), no se tendrán en cuenta en las expresiones de cálculo de las normas ISO y AGMA, los factores que hacen referencia a estos errores, como tampoco los que hacen referencia a la sobrecarga dinámicos de la transmisión. Estas simplificaciones son para que haya igualdad de condiciones entre lo planteado por las normas antes mencionadas y la simulación numérica. Dichas simplificaciones solo tienen valor desde el punto vista teórico, ya que desde el práctico es imprescindible tener en cuenta cada factor. No obstante, estas simplificaciones son necesarias para comparar los resultados según los métodos objeto de estudio ya que así, se consideran los mismos parámetros, por lo cual se pueden comparar los resultados.

Por ello solo se incluirán en las ecuaciones los factores que hacen referencia únicamente a la geometría de la transmisión. Esto se debe fundamentalmente a:

- El modelo geométrico utilizado para la simulación por el método de los elementos finitos, tiene los dientes del engranaje con el perfil ideal (sin errores de fabricación y montaje).
- Se analizan algunos dientes del engranaje, no el montaje de la transmisión completa.
- No se considera la lubricación.

Estas simplificaciones son para poder comparar los resultados teóricos con los obtenidos a partir de la simulación numérica. Teniendo en cuenta lo antes planteado, las ecuaciones para determinar las tensiones de contacto, en engranes rectos de perfil evolvente según las normas ISO y AGMA quedarán tal como se muestran en las ecuaciones 4 y 5 respectivamente.

Según las normas ISO.

$$\sigma_H = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_1 \cdot b} \cdot \frac{u + 1}{u}} \quad (4)$$

Según las normas AGMA.

$$S_C = C_P \sqrt{\frac{F_t}{b \cdot D \cdot I}} \quad (5)$$

Donde Z_H , Z_ϵ , Z_β son los coeficientes de zona, de recubrimiento y de ángulo de hélice respectivamente. La variable b es el ancho del engrane el cual se considerará igual a l_c . Z_E y C_P consideran la influencia de las propiedades elásticas del material de los dientes del piñón y el

engrane y tendrán el mismo valor. Finalmente las variables u , d_1 , D , e l son la relación de transmisión, diámetro primitivo, diámetro de paso y el factor de geometría respectivamente.

Punto de aplicación de la presión de contacto en los engranes

Para el cálculo por elementos finitos es necesario determinar las zonas del perfil del diente donde se aplicarán las cargas. Según plantea la ISO, esto sucede en el punto de rodadura, o sea, a una distancia del centro del piñón igual a r_1 (ecuación 6).

$$r_1 = \frac{m \cdot Z_1}{2 \cdot \cos(\beta)} \quad (6)$$

Siendo m y Z_1 el módulo y número de dientes del piñón respectivamente. El ángulo β en este caso es igual a 0° .

Por su parte la AGMA plantea que los máximos esfuerzos de contacto suceden en el punto de contacto único inferior del piñón, situado a una distancia del centro de dicho piñón (r_{ui}) (ecuación 7).

$$r_{ui} = r_{b1} \sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{r_{fin}}{r_{b1}} \right)^2 - 1} - \frac{2\pi}{Z_1} \right)^2 + 1} \quad (7)$$

Donde r_{fin} es el radio de finalización de engrane, r_{b1} , r_{p1} , r_{b2} son los radios base y primitivos del piñón y la rueda respectivamente. Una vez determinada las distancias del centro del engrane hasta el punto de aplicación de la carga según la norma correspondiente, es posible delimitar la zona de aplicación de la carga, la cual tendrá forma rectangular con un ancho igual a $2B$ según lo establecido por Hertz (ecuación 1), mientras que la longitud coincide con el ancho del engrane (figura 3).

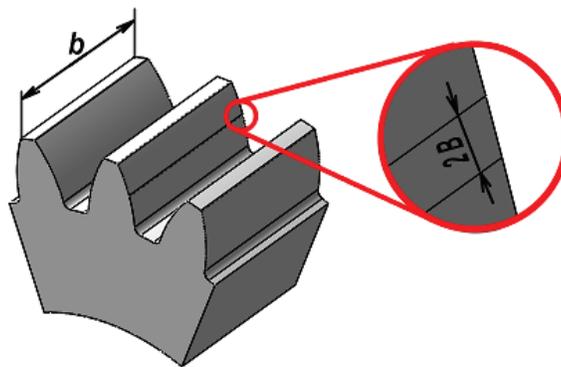


Figura 3. Zona de aplicación de la carga.

De acuerdo a las características del perfil evolvente de los dientes de los engranes, el punto de contacto entre dichos dientes se puede considerar como dos cilindros en contacto, por lo que es aplicable la teoría de Hertz. Para ello sería preciso conocer los diámetros D_1 y D_2 de estos cilindros en el punto de contacto, de acuerdo a las dos normas estudiadas (ecuaciones 8 y 9). Existen ligeras diferencias entre los resultados del cálculo de dichos diámetros, debido a la forma de calcular las distintas variables presentes en las ecuaciones 8 y 9 de acuerdo a las normas objeto de estudio. Los resultados obtenidos se utilizan en la ecuación 1 para determinar el semiancho del área de contacto.

$$D_1 = 2 \left[R_P - \left(p_b - 0,5 \left(\sqrt{D_{oP}^2 - D_{bP}^2} - \sqrt{D_p^2 - D_{bP}^2} \right) \right) \right] \quad (8)$$

$$D_2 = 2 \left[R_G + \left(p_b - 0,5 \left(\sqrt{D_{oP}^2 - D_{bP}^2} - \sqrt{D_p^2 - D_{bP}^2} \right) \right) \right] \quad (9)$$

Donde R_p , R_G son los radios de curvatura del piñón y el engrane respectivamente, mientras que D_{oP} , D_{bP} y D_p son los diámetros exteriores, de base y de paso del piñón respectivamente y p_b es el paso base.

Consideraciones para los estudios

Para realizar los cálculos y el posterior análisis de los resultados, se fijaron determinados parámetros, los cuales se tendrán en cuenta para cada variante. Se calcularon 10 variantes las cuales se obtuvieron de la combinación de piñones de 18 y 25 dientes con 5 valores de módulos (m) según la norma ISO y los pasos diametrales equivalentes (Pd_{eq}) según la AGMA, de los cuales se obtuvo el valor normalizado (Pd_{no}) (cuadro 1). El ancho de dichos piñones es 48 mm al igual que los cilindros para el caso de la teoría de Hertz.

Cuadro 1. Parámetros que invariantes para cada caso de estudio.

Nº	m (mm)	Pd_{equiv} (in ⁻¹)	Pd_{norm} (in ⁻¹)	Z_1	Z_2	$b = l_c$ (mm)	$C_p = Z_E$ (MPa ^{1/2})
1	1	25,4	24	18	31	48	190,653
2	1	25,4	24	25	31	48	190,653
3	2	12,7	12	18	31	48	190,653
4	2	12,7	12	25	31	48	190,653
5	3	8,46	8	18	31	48	190,653
6	3	8,46	8	25	31	48	190,653
7	4	6,35	6	18	31	48	190,653
8	4	6,35	6	25	31	48	190,653
9	5	5,08	5	18	31	48	190,653
10	5	5,08	5	25	31	48	190,653

Cargas y restricciones

Para la aplicación de la carga a la cual se verán sometidas todas las variantes, se consideró un valor de momento torsor M_t de 47,746 N m a partir del cual y conjuntamente con los parámetros geométricos de los engrane a calcular, se determinaron los valores de las fuerzas F_t y F_n . En los cuadros 2 y 3 se muestran los valores de estas fuerzas así como los valores de B y $P_{máx}$ para cada variante a calcular según lo planteado por la teoría de Hertz y las normas ISO y AGMA.

Cuadro 2. Parámetros según la ISO.

N°	m (mm)	Z	r_i (m)	B (m)	F_t (N)	F_n (N)	$P_{\text{máx}}$ (MPa)
1	1	18	0,0090	$5,006 \cdot 10^{-5}$	5305,162	5645,636	1495,7
2	1	25	0,0125	$4,790 \cdot 10^{-5}$	3819,717	4064,858	1125,4
3	2	18	0,0180	$5,006 \cdot 10^{-5}$	2652,581	2822,818	747,8
4	2	25	0,0250	$4,790 \cdot 10^{-5}$	1909,858	2032,429	562,7
5	3	18	0,0270	$5,006 \cdot 10^{-5}$	1768,387	1881,879	498,5
6	3	25	0,0375	$4,790 \cdot 10^{-5}$	1273,239	1354,953	375,1
7	4	18	0,0360	$5,006 \cdot 10^{-5}$	1326,291	1411,409	373,9
8	4	25	0,0500	$4,790 \cdot 10^{-5}$	954,9292	1016,214	281,3
9	5	18	0,0450	$5,006 \cdot 10^{-5}$	1061,032	1129,127	299,1
10	5	25	0,0625	$4,790 \cdot 10^{-5}$	763,9434	812,9716	225

Cuadro 3. Parámetros según la AGMA.

N°	m (mm)	Z	r_{ui} (m)	B (m)	F_t (N)	F_n (N)	$P_{\text{máx}}$ (MPa)
1	1	18	0,0092	$5,15 \cdot 10^{-5}$	5305,162	5645,63	1453,9
2	1	25	0,0124	$4,928 \cdot 10^{-5}$	3819,717	4064,857	1093,9
3	2	18	0,0185	$5,15 \cdot 10^{-5}$	2652,581	2822,818	726,95
4	2	25	0,0249	$4,928 \cdot 10^{-5}$	1909,858	2032,429	546,98
5	3	18	0,0278	$5,15 \cdot 10^{-5}$	1768,387	1881,878	484,63
6	3	25	0,0374	$4,928 \cdot 10^{-5}$	1273,239	1354,952	364,65
7	4	18	0,0371	$5,15 \cdot 10^{-5}$	1326,290	1411,409	363,47
8	4	25	0,0499	$4,928 \cdot 10^{-5}$	954,9292	1016,214	273,49
9	5	18	0,0445	$5,046 \cdot 10^{-5}$	1061,032	1129,127	296,77
10	5	25	0,0599	$4,828 \cdot 10^{-5}$	763,9434	812,9715	223,3

Para la simulación numérica las cargas se aplicaron en las zonas del diente delimitada por dos veces el semiancho del área de contacto B establecido por Hertz (ecuación 1). Las distancias desde el centro del engrane al punto medio del área de aplicación de las cargas, se determina según lo planteado por las normas objeto de estudio y que se especifican en las ecuaciones 6 y 7 y los valores obtenidos para cada variante en los cuadros 2 y 3. Para simplificar el modelo de cálculo, se tomó una porción del engrane que incluye tres dientes, siendo en el diente central donde se aplicará la carga. Se eliminaron todos los grados de libertad del modelo aplicando restricciones en el cubo de la rueda y las caras laterales de la porción de engranaje (figura 4). Con esta simplificación se disminuye el tiempo de cálculo y no se compromete la calidad de los resultados obtenidos, ya que la zona del modelo a analizar se encuentra lo suficientemente alejada de los límites geométricos del modelo, como para que el estado tensional no se vea afectado por la cercanía de las restricciones de acuerdo al principio de Saint Venant. En investigaciones como las desarrolladas por [4, 12-14] también utilizan este tipo de simplificación obteniendo resultados satisfactorios, lo cual demuestran su efectividad.

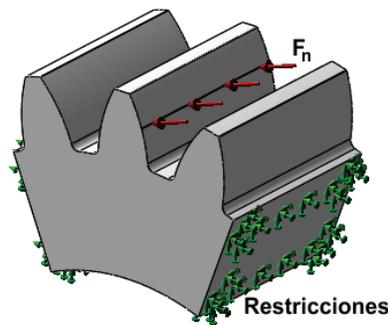


Figura 4. Cargas y restricciones.

Mallado de los modelos

En gran medida, la exactitud de los resultados depende de las características de la malla del modelo a calcular tal como plantea [7, 15, 16]. Por tal motivo para el mallado de los modelos se escogió un elemento finito sólido tetraédrico de alto orden (10 nodos), con tres grados de libertad por nodo. Para garantizar mayor precisión en los resultados, en la zona de aplicación de carga se utilizó una densidad de malla más fina que para el resto del modelo (figura 5), tal como plantea [12, 17]. Los modelos se mallaron con un tamaño de elementos de 4 mm mientras que el control de mallado se realizó con un tamaño de elemento de 0,05 mm. Para comprobar la calidad de la malla y con esto la de los resultados, se utilizó el método adaptativo p , el cual utiliza un orden de elemento progresivamente superior. Para los estudios, los resultados serán adecuados cuando la variación del valor de raíz cuadrada de las tensiones en nodos de von Mises es igual o menor al 0,5%.

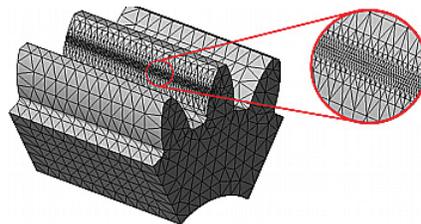


Figura 5. Mallado de los modelos.

Para los cálculos a realizar se consideró un acero AISI 4340 el cual es uno de los materiales utilizados para la fabricación de engranajes, por tener propiedades mecánicas acordes a las exigencias del destino de servicio de los mismos. En el cuadro 4 se muestran las propiedades mecánicas de dicho acero.

Cuadro 4. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340 normalizado.

Propiedad	Valor	Unidad
Límite elástico	710	MPa
Límite de tracción	1110	MPa
Módulo elástico	200	GPa
Módulo cortante	78	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	
Densidad	7850	kg (m ³) ⁻¹

Resultados

Una vez realizada la simulación numérica teniendo en cuenta los parámetros establecidos por las normas objeto de estudio (cuadros 2 y 3), se obtuvieron los valores de tensiones para cada variante propuesta. La variable que se tiene en cuenta para la comparación de los posteriores resultados fue la tensión de von Mises, coincidiendo esto con los estudios realizados por [4]. A continuación, se muestran los resultados para el primer caso de estudio (figura 6).

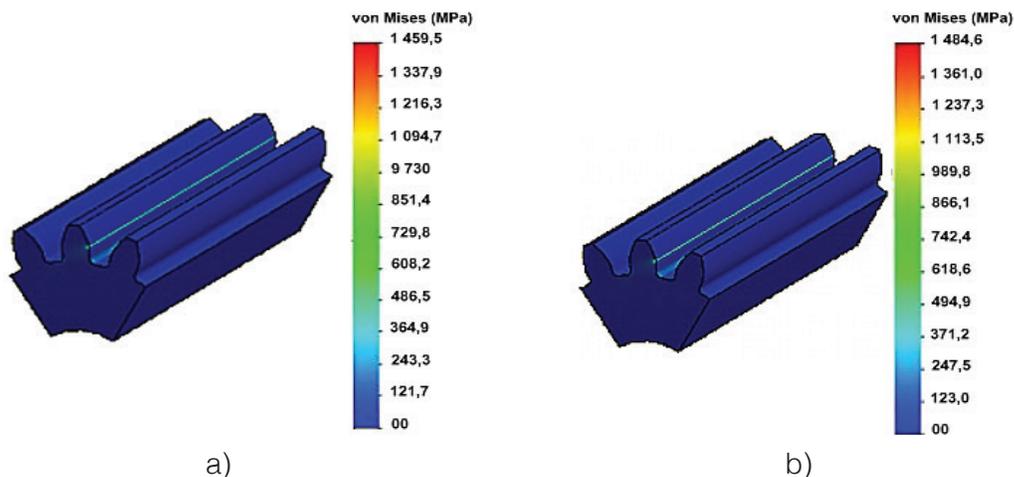


Figura 6. Resultados del cálculo por elementos finitos para el primer caso de estudio. a) ISO MEF. b) AGMA MEF.

De forma similar se procedió a realizar el cálculo de cada variante a partir de los métodos establecidos en esta investigación. En el cuadro 5 se muestran los valores de tensiones obtenidos para cada variante según los parámetros correspondientes a cada caso y teniendo en cuenta los parámetros de cada norma.

Cuadro 5. Valores de tensiones de acuerdo a tres métodos diferentes, teniendo en cuenta los parámetros de las normas ISO y AGMA.

Nº	Según la ISO			Según la AGMA		
	ISO Hertz (MPa)	ISO (MPa)	ISO MEF (MPa)	AGMA Hertz (MPa)	AGMA (MPa)	AGMA MEF (MPa)
1	1495,7	1484,8	1459,5	1453,9	1538,8	1484,6
2	1125,4	1142,9	1116,2	1093,9	1131,7	1114,06
3	747,8	742,4	736,5	726,95	769,4	741,2
4	562,7	571,4	565,3	546,98	565,8	542,6
5	498,5	494,9	486,8	484,63	512,9	486,7
6	375,1	380,9	379,09	364,65	377,2	371,7
7	373,9	371,2	369,5	363,47	384,7	362,3
8	281,3	285,7	284,1	273,49	282,9	278,5
9	299,1	296,9	286,08	296,77	314,1	289,4
10	225	228,5	223,8	223,3	231	222,7

A partir de los resultados obtenidos, se determinó las medias globales de cada caso de estudio (cuadro 6), observándose que el mayor valor corresponde a las tensiones según la norma AGMA.

Cuadro 6. Medias globales para cada caso de estudio.

Métodos de estudio	Media (MPa)
AGMA Hertz	582,804
AGMA MEF	589,370
ISO MEF	590,687
ISO Hertz	598,458
ISO	599,960
AGMA	610,850
Media global	595,355

Para poder comparar los resultados, se analizaron las diferencias entre las medias de los resultados de las tensiones calculadas por cada método, por lo que se aplicó un procedimiento de comparación múltiple para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. Estos resultados se exponen en la figura 6 y los valores obtenidos se muestran más detalladamente en el cuadro 7.

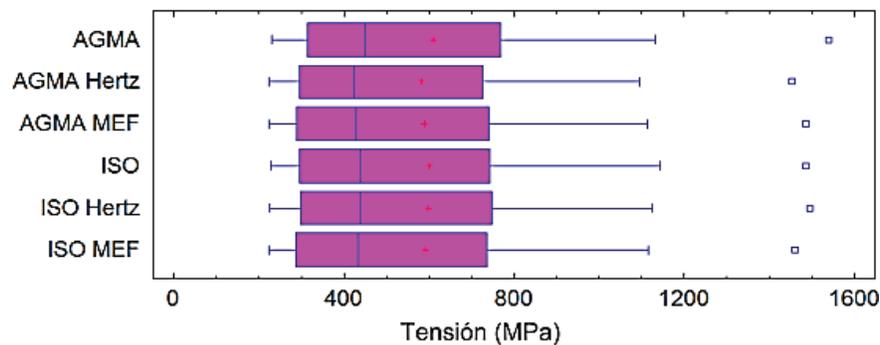


Figura 7. Comparación de los resultados.

Cuadro 7. Diferencias entre todos los métodos de cálculos.

Contraste	Diferencias (MPa)
AGMA MEF - ISO MEF	-1,31
ISO - ISO Hertz	1,50
AGMA Hertz - AGMA MEF	-6,56
ISO Hertz - ISO MEF	7,77
AGMA Hertz - ISO MEF	-7,88
AGMA MEF - ISO Hertz	-9,08
ISO - ISO MEF	9,27
AGMA MEF - ISO	-10,59
AGMA - ISO	10,89
AGMA - ISO Hertz	12,39
AGMA Hertz - ISO Hertz	-15,65
AGMA Hertz - ISO	-17,15
AGMA - ISO MEF	20,16
AGMA - AGMA MEF	21,48
AGMA - AGMA Hertz	28,04

Al analizar las diferencias entre las medias (cuadro 7), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ningún par de medias a un nivel de confianza de un 99,0 %. Esto demuestra que el método de los elementos finitos, puede ser una alternativa para el cálculo de las tensiones de contacto en engranajes cilíndricos de dientes rectos.

Se puede destacar que los resultados obtenidos entre la ISO – ISO Hertz tienen un mejor comportamiento que los de la AGMA – AGMA Hertz, lo cual demuestra que la norma ISO para el cálculo de tensiones de contacto, se asemeja más a lo planteado por Hertz que la norma AGMA. Los resultados por el método de los elementos finitos para las dos normas analizadas se asemejan más a los resultados obtenidos por Hertz, que es la teoría que sirve como base a las normas antes mencionadas. Por último, los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos se acercan más a los de la norma ISO que los obtenidos por la AGMA.

Conclusiones

Al comparar los resultados obtenidos por los diferentes métodos de cálculo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para un nivel de confianza de un 99 % lo cual pone de manifiesto la efectividad de cada método. Los resultados obtenidos de acuerdo a lo planteado por la norma ISO se asemeja más a los obtenidos a partir de la teoría de Hertz. En la investigación se demostró que la simulación numérica resulta ser una alternativa más para el cálculo de tensiones de contacto en engranes cilíndricos de diente recto, lo cual puede realizarse con un software de cálculo por elementos finitos. La principal limitación de este método está dado por las simplificaciones que hay que realizar, sin embargo se pueden obtener como resultado un gran número de variables como diferentes tipos de tensiones, deformaciones, desplazamientos que con los otros métodos se obtienen. Esto serviría para entender mejor el estado tensional al que se ve sometido un engrane durante su funcionamiento.

Referencias

- [1] M. Jimenez-Martinez, "Manufacturing effects on fatigue strength," *Engineering Failure Analysis*, vol. 108, p. 104339, 2020/01/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104339>
- [2] R. Sun, C. Song, C. Zhu, X. Yang, and X. Li, "Computational study of pitting defect influence on mesh stiffness for straight beveloid gear," *Engineering Failure Analysis*, vol. 119, p. 104971, 2021/01/01/ 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104971>
- [3] H. Liu, H. Liu, C. Zhu, and J. Tang, "Study on gear contact fatigue failure competition mechanism considering tooth wear evolution," *Tribology International*, vol. 147, p. 106277, 2020/07/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106277>
- [4] S. S. Patil and S. Karuppanan, "Evaluation of the Effect of Friction in Gear Contact Stresses," in *Tribology in Materials and Applications*, J. K. Katiyar, P. Ramkumar, T. V. V. L. N. Rao, and J. P. Davim, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 227-242.
- [5] *Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth*, 2016.
- [6] *Calculation of load capacity of spur and helical gears — Part 2: Calculation of surface durability (pitting)*, 2019.
- [7] I. Gonzalez-Perez and A. Fuentes-Aznar, "Implementation of a finite element model for stress analysis of gear drives based on multi-point constraints," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 117, pp. 35-47, 2017/11/01/ 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.07.005>
- [8] M. B. Sánchez, M. Pleguezuelos, and J. I. Pedrero, "Approximate equations for the meshing stiffness and the load sharing ratio of spur gears including hertzian effects," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 109, pp. 231-249, 2017/03/01/ 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.11.014>
- [9] P. A. Gourgiotis, T. Zisis, A. E. Giannakopoulos, and H. G. Georgiadis, "The Hertz contact problem in couple-stress elasticity," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 168, pp. 228-237, 2019/08/15/ 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.03.032>
- [10] V. L. Popov, *Contact Mechanics and Friction*, 2 ed. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.

- [11] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 10 ed. México: McGraw-Hill, 2018.
- [12] P. Sainsot and P. Velez, "On contact deflection and stiffness in spur and helical gears," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 154, p. 104049, 2020/12/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104049>
- [13] T. J. Lisle, B. A. Shaw, and R. C. Frazer, "External spur gear root bending stress: A comparison of ISO 6336:2006, AGMA 2101-D04, ANSYS finite element analysis and strain gauge techniques," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 111, pp. 1-9, 2017/05/01/ 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.01.006>
- [14] R. Thirumurugan and N. Gnanasekar, "Influence of finite element model, load-sharing and load distribution on crack propagation path in spur gear drive," *Engineering Failure Analysis*, vol. 110, p. 104383, 2020/03/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104383>
- [15] W. Qu, H. Ding, and J. Tang, "An innovative semi-analytical determination approach to numerical loaded tooth contact analysis (NLTC) for spiral bevel and hypoid gears," *Advances in Engineering Software*, vol. 149, p. 102892, 2020/11/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102892>
- [16] Y. M. Ramos , J. A. Bosch, A. Á. Álvarez, S. A. Santana, and R. M. Arias, "Cálculo por elementos finitos de las guías de un minitorno," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 24, no. 2, pp. 33-41, 2020.
- [17] B. El Yousfi, A. Soualhi, K. Medjaher, and F. Guillet, "New approach for gear mesh stiffness evaluation of spur gears with surface defects," *Engineering Failure Analysis*, vol. 116, p. 104740, 2020/10/01/ 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104740>
- [18] MatWeb. (2020, 22 de enero). *Database of material properties. Acero AISI 4340, normalizado*. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4a3cfc1e1cfd451091e67d3f3b66bb80&ckck=1>

Inmunoterapia activa con anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de páncreas

Active immunotherapy with monoclonal antibodies as a therapeutic option for the treatment of pancreatic cancer

Arisai Barquero-Solano¹, Gloriana Guevara-Saborío²,
Jeison Montero-Rivera³, Lázaro Vargas-Sandoval⁴,
Luis Daniel Velásquez-Alfaro⁵, Juan José Mora-Román⁶

Fecha de recepción: 22 de mayo de 2021

Fecha de aprobación: 13 de setiembre de 2021

Barquero-Solano, A; Guevara-Saborío, G; Montero-Rivera, J; Vargas-Sandoval, L; Velásquez-Alfaro, L.D; Mora-Román, J.J. Inmunoterapia activa con anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer de páncreas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 16-34.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5612>

1 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Correo electrónico: arisai.barquero@ucr.ac.cr

2 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Correo electrónico: gloriana.guevara@ucr.ac.cr

3 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: jeison.montero@ucr.ac.cr

4 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: lazaro.vargas@ucr.ac.cr

5 Estudiante de Licenciatura en Farmacia, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Correo electrónico: luis.velasquezalfaro@ucr.ac.cr

6 Máster en Bioquímica, Departamento de Farmacia Industrial, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Correo electrónico: juanjose.moraroman@ucr.ac.cr

Palabras clave

Cáncer de páncreas; tratamiento; anticuerpos monoclonales; inmunoterapia activa; punto de control inmunitario.

Resumen

El cáncer de páncreas es el sexto más mortal a nivel mundial, y en el caso específico de Costa Rica el sétimo en importancia. La gran problemática asociada a esta patología es un diagnóstico en etapas avanzadas, ya que sus síntomas son muy inespecíficos y en muchos casos no se presentan. Abonado a lo anterior, el tratamiento por excelencia es la cirugía, mas no resulta ser del todo alentadora, pues la mayoría de pacientes no pueden ser operados, y aunque se utilice quimioterapia y radioterapia, la supervivencia de vida a los cinco años es sumamente baja. Por eso, se han investigado nuevas opciones terapéuticas, incluidas las biológicas. Dentro de ellas, se encuentran los anticuerpos monoclonales, cuyo mecanismo de acción implica una inmunoterapia activa. En este momento, se encuentran en fase de investigación a través de estudios clínicos de fases I y II. Gran parte se está evaluando en combinación con otros fármacos. Los resultados sobre estos estudios son escasos, pero se espera a futuro disponer de mayor información, junto con un número creciente de opciones que permitan en el mediano plazo su disponibilidad como alternativas terapéuticas para mejorar la esperanza y la calidad de vida de las personas que padecen esta enfermedad.

Keywords

Pancreatic cancer; treatment; monoclonal antibodies; active immunotherapy; immune checkpoint.

Abstract

Pancreatic cancer is the sixth most deadly worldwide, and in the specific case of Costa Rica, the seventh in importance. The significant problem associated with this pathology is a diagnosis in advanced stages since its symptoms are very nonspecific, and in many cases, they do not appear. Also, the treatment per excellence is surgery, but it does not turn out to be entirely encouraging since most patients cannot underwent surgery on, and although chemotherapy and radiotherapy are used, life survival at five years is extremely low. For this reason, new therapeutic options, including biological ones, have been investigated. Among them are monoclonal antibodies, whose mechanism of action involves active immunotherapy. At this time, they are in the research stage through phase I and II clinical studies. Most are being evaluated in combination with other drugs. The results of these investigations are scarce, but it is expected in the future to have more information, together with a growing number of options that will allow their availability in the medium term as therapeutic alternatives to improve the hope and quality of life of the people who suffer from this sickness.

Introducción

El cáncer es una patología cuya principal característica es la proliferación celular descontrolada, porque las células sufren mitosis indefinidamente. Es ocasionado por cualquier fenómeno capaz de lesionar el ADN, como un agente mutagénico (radiaciones o sustancias químicas) o factores que estimulen la mitosis, entre ellos, algunas hormonas, lesiones crónicas en los tejidos, agentes inflamatorios, virus y oncogenes [1].

El adenocarcinoma ductal pancreático es la neoplasia pancreática maligna más frecuente. Se le conoce comúnmente como cáncer de páncreas [2]. Representa la cuarta causa de mortalidad atribuible a ella en países desarrollados (aunque se prevé que podría ser la segunda en algunos años) y la segunda de cáncer digestivo [2, 3].

El riesgo de desarrollarlo se ha relacionado con tabaquismo, obesidad, sedentarismo, diabetes, dieta rica en carne y grasas saturadas, así como pobre en frutas y verduras, consumo excesivo de alcohol, café, ácido acetilsalicílico e infecciones por *Helicobacter pylori* y hepatitis B. Además, la pancreatitis crónica y los quistes pancreáticos propician el riesgo de padecerla. En cuanto al factor genético, entre un 5 y un 10 % de los casos tienen antecedentes familiares y se ha relacionado con mutaciones de BRCA-1, BRCA-2, PALB2, ATM y CDKN2A [4]. El factor demográfico más relevante es la edad avanzada. Cerca del 80 % de los casos se da entre los 60 y los 80 años, y se relaciona primordialmente con el sexo masculino, personas de tez negra y ascendencia judía [2].

Su pronóstico es poco alentador, porque sus tasas de incidencia y de mortalidad son muy similares [1]. Por lo general, el diagnóstico se da en etapas avanzadas, ya que sus síntomas son sumamente inespecíficos y ciertos casos son asintomáticos. Adicionalmente, existen dificultades para obtener imágenes de tumores en etapas tempranas, así como falta de marcadores tumorales sensibles y específicos para el diagnóstico [3].

Con respecto al tratamiento, la cirugía solo es posible en un 15 a un 20 % de los casos y la supervivencia a cinco años de los pacientes operados no supera el 25 %. Más de la mitad de estas personas presenta recidivas. Este pronóstico se debe a la afectación ganglionar, los márgenes quirúrgicos y el tamaño del tumor, entre otros [4]. En algunos casos, también se recomienda quimioterapia con gemcitabina o FOLFIRINOX, una combinación de cuatro fármacos: ácido folínico o leucovorina (FOL), 5-fluorouracilo, irinotecan (IRIN) y oxaliplatino (OX). Es primordial resaltar que desde el diagnóstico, cualquier paciente debe recibir un adecuado tratamiento paliativo, simultáneo al abordaje oportuno, según su situación y el estadio de la enfermedad [4, 5].

Debido a los efectos adversos de estos tratamientos y su poca efectividad, se están buscando nuevas opciones para tratarlo. Una de ellas es la inmunoterapia, pues los tumores escapan de la vigilancia inmunológica por diversos mecanismos como la secreción de sustancias inmunosupresoras, entre ellas el factor de necrosis tumoral-beta (TGF- β , por sus siglas en inglés), así como la ausencia de células T efectoras y la baja inmunogenicidad por expresión de ligandos de muerte celular programada: PD-L1 y PD-L2 (por sus siglas en inglés). Dada la gran promesa de las terapias inmunes en otras neoplasias malignas, hay razones para esperar que la modulación del microambiente tumoral pueda aumentar su control en el cáncer de páncreas [3, 6].

Los anticuerpos monoclonales se han convertido en parte indispensable de la oncología clínica, reemplazado la quimioterapia en el tratamiento de melanoma metastásico y convirtiéndose en primera línea para hacerle frente a otros tumores malignos. Estas son inmunoglobulinas (Ig) que se secretan de una población de células idénticas. Todas las moléculas aprobadas por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) comprenden la clase IgG, aunque numerosos artículos de investigación han propuesto fármacos de IgM, IgG, IgA e IgE dirigidos específicamente contra antígenos asociados a tumores [6, 7].

Por tanto, el objetivo de este artículo es realizar una revisión sobre la inmunoterapia activa con anticuerpos monoclonales como opción terapéutica para el tratamiento del cáncer pancreático.

Generalidades del cáncer de páncreas

El páncreas es una parte esencial de la glándula gastrointestinal. Está conformado por células acinares (secretan una enzima digestiva), células ductales (secretan bicarbonato), islotes endocrinos y células estrelladas inactivas. Es un órgano endodérmico capaz de regular la digestión de proteínas y de carbohidratos, junto con el control de la glucosa y la homeostasis [8].

Desde el punto de vista anatómico, se diferencia en endocrino y exocrino, formando el 20 y el 80 % del órgano, respectivamente. La parte exocrina está constituida por las células acinares y las conductoras, mientras que el endocrino comprende los islotes de Langerhans. Estos últimos actúan como una maquinaria de secreción hormonal que proporciona insulina, glucagón y somatostatina al torrente sanguíneo [8].

Dentro de las patologías que afectan el páncreas está el cáncer. Se pueden definir tres subtipos: clásico, cuasimesenquimal y exocrino. El subtipo clásico tiene una alta expresión de genes asociados a la adhesión y a las células epiteliales, el quiasimesenquimal muestra una elevada presencia de genes asociados a la mesénquima (tejido primitivo mesodérmico del que derivan gran parte de los tejidos orgánicos) y el de tipo exocrino una expresión relativamente alta de genes de enzimas digestivas derivadas de células tumorales. El cáncer pancreático puede surgir de una variedad de precursores de células, activando el oncogén K-RAS, que al mutar puede provocar esta patología. Dependiendo del subtipo, así va a ser su prevalencia. Por ejemplo, existe mayor presencia de K-RAS en el clásico que en el cuasimensenquimal [9].

El cáncer tiene la tendencia a propagarse e invadir tejidos cercanos (metástasis). La mayoría de los casos son adenocarcinomas que surgen en las células epiteliales. Los mismos son específicos de los tejidos glandulares [8].

Es importante indicar su clasificación de acuerdo con la etapa en que se encuentre. Según el Comité Conjunto Estadounidense sobre el Cáncer (AJCC, por sus siglas en inglés), se clasifica en cuatro estadios. Las mismas se aprecian en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación del cáncer de páncreas según su estadio [10].

Estadio	Características
0	Cáncer <i>in situ</i> , no ha crecido fuera del conducto en el que se originó.
IA	El tumor se encuentra en el páncreas, no mide más de 2 cm y no se ha propagado a los ganglios linfáticos o a otras partes del cuerpo.
IB	El tumor se encuentra en el páncreas, mide más de 2 cm y no se ha propagado a los ganglios linfáticos o a otras partes del cuerpo.
IIA	El tumor se extiende más allá del páncreas, mide más de 4 cm y no se ha propagado a las arterias, las venas, los ganglios linfáticos u otras partes del cuerpo.
IIB	El tumor, de cualquier tamaño, no se ha diseminado a las arterias o venas cercanas. Se ha diseminado de uno a tres ganglios linfáticos regionales, pero no a otras partes del cuerpo.
III	El tumor, de cualquier tamaño, se ha propagado a cuatro o más ganglios linfáticos regionales, pero no a las arterias, las venas u otras partes del cuerpo cercanas. El tumor se ha propagado a las arterias y venas cercanas, y es posible que se haya diseminado a ganglios linfáticos regionales. El cáncer no se ha diseminado a otras partes del cuerpo.
IV	El tumor se ha propagado a otras partes del cuerpo.

Participación del sistema inmune en el desarrollo de cáncer pancreático

A nivel del sistema inmune, se caracteriza por la presencia de un entorno inmunosupresor. Se ha mostrado que las células inmunosupresoras, sobre todo linfocitos T reguladores (Treg), macrófagos asociados a tumores M2 y supresores derivados de mieloides (MDSC, por sus siglas en inglés), están ampliamente presentes en las primeras etapas de la enfermedad [11].

La respuesta inmune tiene la capacidad de retrasar el crecimiento tumoral. Sin embargo, estos mecanismos de defensa pueden no ser efectivos por la evasión de la vigilancia inmune. Los linfocitos T cooperadores (CD4+, de cúmulo de diferenciación 4) producen interferón-gamma (IFN- γ) al reconocer antígenos tumorales. Provoca que el endotelio aumente la expresión de moléculas de los complejos mayores de histocompatibilidad clases I y II (MHC-I y II, por sus siglas en inglés). Los antígenos tumorales expresados por células cancerígenas son presentados en las moléculas de clase I a los linfocitos T citotóxicos (CD8+). Estas células secretan citoquinas hacia las células tumorales y provocan su muerte celular programada. Los linfocitos CD8+ y los CD4+ o cooperadores también liberan factor de necrosis tumoral-alfa (TNF- α , por sus siglas en inglés), promoviendo la inflamación del tejido tumoral y la atracción de más leucocitos [12].

A pesar de ello, las células cancerígenas son capaces de suprimir estas acciones a través de distintos mecanismos. Por ejemplo, se presentan anomalías en las células presentadoras de antígenos (APC, por sus siglas en inglés), afectando la maduración y la capacidad funcional de las células dendríticas. Igualmente, existe la posibilidad de limitar la generación de linfocitos T específicos efectores e inducir su anergia o apoptosis. Asimismo, en diversos tumores se ve la supresión de la producción de interleucina-2 (IL-2) e IFN- γ [12].

La acción de los linfocitos Treg puede provocar una inadecuada expansión de células T efectoras frente a los antígenos tumorales, las cuales controlan el número de CD4+. Como complemento, las células tumorales pueden producir quimioquinas que atraen células Treg al entorno del tumor y suprimir el reconocimiento de antígenos tumorales, como sucede con los linfocitos NK (del inglés Natural Killer) [12].

Desarrollo del cáncer de páncreas

Los protooncogenes, genes supresores y genes de reparación juegan un papel importante. Se detalla cada uno para entender la participación en su desarrollo.

Protooncogenes

Son responsables de estimular y controlar la proliferación celular. Su mutación conlleva a un crecimiento sin control y por ende, al desarrollo de cáncer. Si una de las copias del gen se encuentra mutada por un cambio puntual o por su amplificación, se produce su activación [13]. Algunos de los identificados en cáncer pancreático son:

- **Familia de genes Erb:** dentro de ella se encuentra el HER-2/neu, una familia de receptores de crecimiento epidérmico conocido como ErbB2 y el factor de crecimiento epidérmico (EGF, por sus siglas en inglés). Estos factores activan y promueven la diferenciación celular. Su amplificación genera una proliferación descontrolada de las células. Se encuentran presentes entre el 16 y el 65 % de los pacientes [13].
- **Notch 1 y Hedgehog:** tienen como función regular el crecimiento y el desarrollo durante la vida embrionaria de muchos órganos, entre ellos, el páncreas. Inducen la actividad de NF- κ B y la neovascularización del tumor. Si se desregula alguna de estas vías, puede ocasionar cáncer en células madre y provocar el crecimiento de tumores [13].

- **K-RAS:** es un protooncogen localizado en el cromosoma 12p12.1. Pertenece a la familia RAS, la cual cuenta con los protooncogenes H-RAS, K-RAS y N-RAS. Controlan cascadas de señalización preponderantes para la regulación de la proliferación celular, la diferenciación, la modulación del citoesqueleto y la supervivencia de las células [14]. En cáncer pancreático, las mutaciones en K-RAS se hallan entre el 70 y el 90 % de los casos. Desde el punto de vista clínico, esta mutación ha sido relacionada con disminución en la sobrevida [13, 15]. Asimismo, la activación de mutaciones oncogénicas de K-RAS a menudo se asocian con resistencia a la quimioterapia y terapias dirigidas [9, 15].

Cuando ocurre una mutación en un protooncogen, no permite que éste sea regulado por un supresor de tumor, entonces pasa a denominarse oncogen. Por esta razón, la localización de sus mutaciones es muy específica y se repite en cada protooncogen en los distintos tipos de cáncer [16].

Genes supresores de tumores

Se encargan de impedir el comienzo del desarrollo cancerígeno, actuando sobre diversos puntos del ciclo celular. Su inactivación propicia el crecimiento tumoral. Son genes recesivos, por lo cual ambas copias deben estar mutadas para que se dé la pérdida de su función [13].

Cabe señalar que la regulación del ciclo celular incide sobre los protooncogenes. Las mutaciones que suceden en los genes que codifican para los supresores tumorales anulan la función de las proteínas asociadas a ellos [16].

Un ejemplo en el cáncer de páncreas es el gen p53, cuya proteína regula la expresión de otros genes como p21 y p16. Asimismo, los productos de los oncogenes p21, p16, p27 actúan como inhibidores de quinasas (CKIs, por sus siglas en inglés), bloqueando la hiperfosforilación del oncogen Rb por inactivación de CDK4-ciclina D y de CDK2-ciclina E [13].

Otros involucrados en cáncer pancreático son SMAD4, CDKN2A y P16/INK4. Su mutación se ha asociado con su progresión [13, 14].

Genes de reparación de ADN

Regulan las enzimas encargadas de la monitorización del ADN formado y reparan los errores generados durante la replicación. Las mutaciones que afectan ambos alelos acumulan errores en el material genético. Cuando se relacionan con los genes reguladores del crecimiento celular, se estimula el cáncer [13, 16].

También existen ciertos factores (además de la susceptibilidad genética) implicados en el desarrollo del cáncer de páncreas. Algunos de ellos son: edad, obesidad, estilo de vida y consumo de alcohol (alto consumo de alcohol puede provocar pancreatitis severa, incrementándose la posibilidad de desarrollarlo) o tabaco (fumadores tienen un mayor riesgo en comparación a los no fumadores). La mayoría de los pacientes son diagnosticados después de la quinta década de edad o más. Del mismo modo, una asociación de obesidad y malos hábitos físicos, junto con factores dietéticos como alto consumo de grasas saturadas, carnes rojas procesadas, y bajo consumo de frutas y verduras propician el riesgo de padecerlo [9].

Epidemiología

El cáncer es la segunda causa de muerte más frecuente en el mundo y el de páncreas se posiciona como el sexto más mortal [17]. Se estimó que en el año 2020 habrían más de 57 000 nuevos casos solo en Estados Unidos y alrededor de 47 000 muertes, en el mismo año, por su causa [18].

En Latinoamérica, Chile presenta una incidencia de 5,5 y 4,9 casos por cada 100 000 personas para hombres y mujeres, respectivamente, con una tasa de mortalidad por cada 100 000 individuos de 5,8 y 5,2 en el mismo orden [19]. En Brasil, se presentan 4,2 casos por cada 100 000 habitantes, equivalente al 2 % de todos los tipos de cáncer [20]. En lo que respecta a Argentina, la incidencia se encuentra alrededor de 7,45 por cada 100 000 hombres y de 5,26 por cada 100 000 mujeres [21].

Para Costa Rica, las últimas estadísticas publicadas por el Ministerio de Salud durante el 2014 exhiben que la incidencia en varones fue de 1,87 y en mujeres de 3,34 por cada 100 000 personas, apareciendo con mayor frecuencia en mayores de 65 años [22]. En cuanto a la mortalidad, en el 2015 se ubicó en el séptimo puesto para ambos sexos en el país. 107 hombres y 126 mujeres fallecieron ese año por su causa [23].

Diagnóstico

Actualmente, el cáncer de páncreas posee reducida sobrevivencia. Un factor asociado a esta condición es que la mayoría de los casos logran identificarse en fases muy avanzadas. El inicio es asintomático y hay falencias para un proceso de diagnóstico eficiente [24, 25].

Por ello, varios organismos han emitido la relevancia de clasificar a los pacientes con factores de riesgo y hacerles pruebas diagnósticas de forma frecuente. Entre los aspectos de mayor atención se pueden mencionar: predisposición genética, en especial la presencia de la enfermedad en un familiar de primer o segundo grado, los síndromes hereditarios y los polimorfismos genéticos asociados a este cáncer. Otros elementos son tabaquismo, exposición a disolventes con base de hidrocarburos o compuestos de cromo, y padecimiento de diabetes mellitus y/o pancreatitis crónica [25, 26].

También, se debe tener un claro concepto de los síntomas y signos más frecuentes de los pacientes que lo padecen. Ellos son: ictericia, dolor abdominal y pérdida de peso (comúnmente llamados la triada del cáncer pancreático). Igualmente, puede presentarse astenia (debilidad o fatiga generalizada), anorexia, dolor abdominal, coluria (presencia de bilis en orina), náuseas, dolor de espalda, diarrea, esteatorrea (presencia de secreciones lipídicas en heces) y tromboflebitis [3, 26]. En estadios más avanzados, puede haber una masa epigástrica palpable, hepatomegalia por metástasis a hígado, dolor intenso por infiltración vascular y nerviosa, obstrucción a la salida gástrica por infiltración duodenal y ascitis por carcinomatosis peritoneal [26].

El diagnóstico se realiza mediante los marcadores tumorales o biomarcadores. Son elementos de naturaleza variable (ácido nucleico, proteína, péptido, o procesos como apoptosis, angiogénesis o proliferación) producidos por diferentes células. Sin embargo, se obtienen en mayor cantidad cuando hay cáncer. Las mismas son detectables en fluidos biológicos como sangre, orina y líquido pleural. Su cantidad en sangre depende de la variabilidad genética del paciente, dado que no se secretan únicamente en condiciones cancerígenas. Como complemento, el origen de algunos biomarcadores es por la respuesta generada por el huésped [26, 27, 28].

Los marcadores tumorales pueden agruparse según dos criterios: origen y utilidad clínica, expresada en términos de sensibilidad y especificidad. Con base en su origen, se han clasificado en producidos por las mismas células tumorales (derivados del tumor) e inducidos por su presencia, producto de la reacción del huésped ante el cáncer [27].

Los marcadores más útiles en cáncer pancreático son el antígeno carbohidrato 19-9 (CA 19-9) y el antígeno carcinoembrionario (CEA, por sus siglas en inglés). Este último se emplea con menor frecuencia en comparación con el primero. No obstante, ninguno es altamente preciso como para indicar con certeza si una persona lo ha desarrollado [26, 27].

Antígeno sializado de Lewis (CA 19-9)

Es un glicolípido monosialogangliósido sintetizado en varios epitelios. Se eleva típicamente en el suero de pacientes con tumores pancreáticos. Cifras inferiores a 40 U/mL se consideran normales para ambos sexos, y no existen diferencias entre fumadores y no fumadores. Valores por encima de 300 U/mL tienen un valor predictivo positivo superior al 90 % [27, 29].

Una razón de utilizarlo en este diagnóstico es que sus niveles séricos aportan información sobre si el tumor detectado es benigno o maligno [30]. También han mostrado el poseer alta especificidad y sensibilidad. Inclusive, algunos estudios señalan que puede ser un indicador de la posibilidad de extraerlo por medio de la cirugía (resecabilidad). Sin embargo, un inconveniente es que valores menores de 121 U/mL generan que su especificidad caiga inclusive al 70 %. Ante este panorama, se debe verificar dicha resecabilidad con una tomografía axial computarizada (TAC) de la zona para aumentar la predicción certera [29].

Otro inconveniente es que otros tumores como los biliares, gástricos, de colon, hígado, ovario, endometrio, pulmón y urotelio pueden cursar con un CA 19.9 sérico elevado. Lo mismo sucede con procesos benignos, entre ellos hepatitis, cirrosis, colangitis, colecistitis, pseudoquiste pancreático, pancreatitis, fibrosis pulmonar, asma bronquial, asbestosis, bronquiectasias, tuberculosis, insuficiencia renal, quistes mucinosos, hidronefrosis, síndrome de Sjögren, artritis reumatoide, lupus eritematoso, dermatopolimiositis y arteritis de células gigantes. En estas situaciones, los valores obtenidos son más moderados [27]. Otra limitación es que la presencia de niveles elevados de bilirrubina disminuye sus niveles, haciéndolo indetectable [29].

Antígeno carcinoembrionario (CEA)

Es una glucoproteína oncofetal asociada a tumores del tracto gastrointestinal, frecuentemente elevada en el cáncer colorrectal. Puede hallarse en otras enfermedades malignas y benignas o incluso en pacientes sin enfermedad aparente. Su aclaramiento sucede por vía hepática, por lo cual suele estar aumentado en casos de metástasis en hígado. Se consideran valores normales por debajo de 2,5 ng/mL en no fumadores e inferiores a 5 ng/mL en fumadores. Su grado de elevación parece correlacionarse con el estadio del tumor. Valores superiores a 20 ng/dL son indicativos de una etapa avanzada [27].

Este biomarcador cuenta con mayor expresión en adenocarcinomas de colon y recto, especialmente en los bien diferenciados, pero pueden observarse incrementos en cáncer de mama, pulmón, páncreas, estómago, vejiga y tiroides. Otras condiciones benignas asociadas con un nivel elevado son: tabaquismo, cistoadenoma mucinoso de ovario, colecistitis, cirrosis, diverticulitis, enfermedad inflamatoria intestinal, pancreatitis, neumonía y tabaquismo [27].

Otras técnicas diagnósticas empleadas, que no requieren biomarcadores, son la ecografía abdominal (poca eficacia en este tipo de cáncer), la tomografía computarizada (complemento del diagnóstico con marcadores tumorales), la tomografía por emisión de positrones (alta sensibilidad en casos metastásicos), la ecoendoscopia (útil incluso en la detección de tumores pequeños, además de poseer gran especificidad y sensibilidad) y la resonancia magnética abdominal (conocimiento del grado de infiltración del tumor) [4].

Tratamiento tradicional

Para el tratamiento de un paciente con cáncer de páncreas, primero se deben evaluar aspectos básicos tales como estadio, ubicación, extensión, tipo de cáncer, infiltración vascular y potencial de resecabilidad. Idealmente, su manejo se debe hacer por parte de un equipo de trabajo multidisciplinario [31].

Uno de los tratamientos es la cirugía. Cuando el tumor es resecable, representa la mejor opción terapéutica a largo plazo. A pesar de ello, cuenta con complejidad técnica, posibles complicaciones derivadas y una mala supervivencia del paciente [31, 32]. Se considera resecable el tumor que no muestre compromiso local avanzado (a nivel de tronco celíaco, arteria hepática o arteria mesentérica superior), no posea obstrucción de una vena, no exhiba invasión de órganos distintos contiguos (excepto el duodeno) y no sea metastásico [33, 34].

En tumores pancreáticos potencialmente resecables, menos del 20 % son aptos para cirugía, ya que deben estar confinados al órgano, sin infiltración vascular [4]. Para los que se encuentran en la cabeza del páncreas se recomienda una duodenopancreatectomía cefálica. Este procedimiento implica la resección de la cabeza del páncreas, en ocasiones acompañada de la región antro pilórica y la porción distal de la vía biliar principal [35]. Por su parte, los que se presentan en cuerpo y cola requieren una pancreatectomía distal o corporocaudal, necesiándose una extirpación del tumor en el área donde se encuentra. Esta estrategia frecuentemente lleva a una esplenectomía [4]. En casos donde es avanzado e irresecable, se aconseja realizar una biopsia previa para descartar factores que conlleven un cuidado especial durante el tratamiento [4, 31].

En cuanto a los regímenes terapéuticos, dependen del tipo de terapia que requiere el paciente. Los considerados de primera línea según la Red Nacional Integral del Cáncer (NCCN, por sus siglas en inglés) se describen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Esquemas quimioterapéuticos de primera línea para el cáncer pancreático de acuerdo al tipo de terapia [36].

Tipo de terapia	Esquemas quimioterapéuticos
Terapia neoadyuvantes (antes de la cirugía) (nota: el tratamiento debe incluir radioterapia)	-FOLFIRINOX. -FOLFIRINOX modificado. -Gemcitabina y paclitaxel ligado a albúmina. -Gemcitabina y cisplatino (para ciertas mutaciones).
Terapia adyuvantes (después de la cirugía y en caso de recibir terapia neoadyuvante)	-FOLFIRINOX modificado. -Gemcitabina más capecitabina.
Terapia adyuvantes (después de la cirugía y en caso de no recibir terapia neoadyuvante)	-Gemcitabina. -5-FU con leucovorina. -Infusión continua de 5-FU. -Capecitabina.
Enfermedad local avanzada (paciente con buen estado de desempeño)	-FOLFIRINOX. -FOLFIRINOX modificado. -Gemcitabina y paclitaxel ligado a albúmina.
Enfermedad local avanzada (paciente con pobre estado de desempeño)	-Gemcitabina. -Capecitabina. -Infusión continua de 5-FU.
Cáncer metastásico (paciente con buen estado de desempeño)	-FOLFIRINOX. -FOLFIRINOX modificado. -Gemcitabina y paclitaxel ligado a albúmina.
Cáncer metastásico (paciente con pobre estado de desempeño)	-Gemcitabina. -Capecitabina. -Infusión continua de 5-FU.

Se denomina FOLFIRINOX a la combinación de cuatro fármacos (ácido folínico o leucovorina, 5-FU, irinotecan y oxaliplatino). Su modificación corresponde a un cambio de dosificación de sus componentes [5]. Los mecanismos de acción y las acciones farmacológicas de los medicamentos mencionados en los regímenes se detallan en el cuadro 3.

Cuadro 3. Mecanismo de acción y efecto farmacológico de los medicamentos usados en los regímenes de primera línea de la guía de la NCCN [37].

Fármaco	Mecanismo de acción	Efecto farmacológico
Capecitabina	Profármaco del fluorouracilo.	Inhibe el crecimiento celular.
5-FU	Reemplaza el uracilo en el ARN, interfiriendo con la síntesis de ADN y ARN.	Inhibe el crecimiento celular.
Gemcitabina	Inhibe la ADN polimerasa y la ribonucleótido reductasa. Es específica para la fase S del ciclo celular. Sin embargo, también actúa en la fase G1.	Inhibe la síntesis de ADN.
Irinotecan	Se une de forma reversible al complejo topoisomerasa I-ADN.	Favorece la ruptura de los complejos y el quiebre del ADN de doble banda.
Leucovorina	Compite de forma activa con el metotrexato por los sitios de transporte y estabiliza la unión del 5-desoxiuridina monofosfato (5-dUMP, por sus siglas en inglés) y la timidilato sintasa.	Incrementa la actividad del 5-FU.
Oxaliplatino	Agente alquilante que se une al ADN y forma enlaces cruzados.	Inhibe la replicación y la transcripción del ADN, ocasionando muerte celular.
Paclitaxel	Mejora la acción de los dímeros de tubulina, promoviendo el ensamblaje de los microtúbulos.	Interfiere con la fase G2 tardía e inhibe la replicación celular.

En términos generales, es un cáncer muy agresivo. Se caracteriza por una notable tolerancia o resistencia a la mayoría de tratamientos comunes como quimioterapia y radioterapia. Además, cuenta con muchas alteraciones epigenéticas, complejos y densos microambientes tumorales, y crecimiento perineural y vascular, así como metástasis temprana (impidiendo la resección quirúrgica en la mayoría de personas). Todos estos factores propician una tasa de supervivencia general a cinco años menor al 7 % y casi todos los sobrevivientes en este momento son el 10 a 20 % de pacientes sometidos a resección quirúrgica. Para ellos, la tasa de supervivencia a cinco años es de alrededor de 15 a 25 % [3].

Su diagnóstico tardío, la escasa disponibilidad de tratamiento realmente eficaz, los porcentajes bajos de tumores resecables, la complicación quirúrgica y su alta mortalidad han ocasionado la búsqueda de terapias más efectivas como son las biológicas, convirtiéndose en un recurso preponderante a nivel médico en los últimos años. Algunos de estos fármacos son capaces de estimular o restaurar las funciones del sistema inmune, contrarrestando patologías como el cáncer. Se pueden clasificar según su origen en: anticuerpos monoclonales, citoquinas (interleucinas, interferones, entre otros), vacunas y terapias génicas. Presentan menos efectos secundarios y son mejor toleradas, siendo específicos y dirigidos contra dianas determinadas [38, 39].

Para la presente investigación fueron de interés los anticuerpos monoclonales. Los mismos se explican a continuación.

Generalidades de los anticuerpos monoclonales

Las terapias con estas moléculas han aportado avances en la medicina durante los últimos años con aplicaciones tanto diagnósticas como terapéuticas [40]. Actualmente, se encuentran aprobados por la FDA y la Agencia Europea de Medicamentos (EMA, por sus siglas en inglés) más de 90 fármacos para el tratamiento de cáncer, autoinmunidad, enfermedades infecciosas e inflamatorias [41].

Los anticuerpos son glicoproteínas que forman parte del sistema inmune. Se producen por las células B y son susceptibles a reconocer antígenos, estimulando o inhibiendo células específicas [42, 43]. Están constituidos por cuatro cadenas de aminoácidos unidas entre sí, dos pesadas y dos ligeras. Poseen una fracción constante denominada cristalizante (Fc) y una variable llamada de unión al antígeno (Fab, por sus siglas en inglés). La región variable incluye tres secuencias yuxtapuestas de 10 aminoácidos llamadas regiones determinantes de complementariedad (CDR, por sus siglas en inglés) 1, 2 y 3. Forman bucles en la superficie y sirven como sitio de unión con el antígeno [40, 44].

Referente a su caracterización y su descubrimiento, se debe señalar el aporte de Behring y Kitasato, quienes establecieron las bases de la inmunidad humoral a finales del siglo XIX. Por su parte, Erlich a finales del siglo XX señaló que las células sanguíneas eran capaces de producir sustancias que reaccionaban ante las toxinas. A continuación, Landsteiner identificó estas funciones y las centró en una molécula que fue llamada anticuerpo. Además, se varió el nombre de toxina por antígeno. Seguidamente, en los años 1940s se identificó el origen de los anticuerpos provenientes de las células B y unos años más tarde se establecieron las IgA, IgD e IgE. No obstante, fue hasta el año 1975 cuando Milstein y Kohler descubrieron los anticuerpos monoclonales murinos en Cambridge. Ellos desarrollaron la técnica del hibridoma [44, 45].

Cuando se habla de anticuerpos monoclonales, pueden establecerse cuatro categorías: murinos, quiméricos, humanizados y humanos. Los murinos se obtienen a partir de ratones (aunque también de otros animales como conejos o ratas) por la técnica del hibridoma. Tienen baja eficiencia en la destrucción de células diana. De igual forma, desarrollan problemas de tolerancia y pueden producir efectos secundarios como hipersensibilidad [46, 47].

Por ello, se construyeron los anticuerpos quiméricos. Constan de una combinación que involucra la parte variable de unión al antígeno del anticuerpo murino con las partes efectoras de la región constante del ser humano, siendo un 30 y un 70 %, respectivamente. El propósito era disminuir el efecto inmunogénico ocasionado por el componente murino [47].

Luego, se elaboraron los humanizados. En este caso, se obtiene con un 95 % de naturaleza humana y un 5 % murina, mediante la presencia de la región CDR del ratón. A pesar de eso, las secuencias no humanas siguieron provocando reacciones cruzadas o sensibilización. De esta manera, se desarrollaron los anticuerpos humanos [47].

Otra clasificación como agentes terapéuticos implica si son conjugados o no conjugados, dependiendo de su unión covalente con otras moléculas con actividades farmacológicas. Una forma conjugada son las inmunotoxinas. Al darse la unión, se disminuye la toxicidad asociada a ellas [47], producto de la especificidad que brinda el anticuerpo, reconociendo la diana terapéutica y eliminando exclusivamente la célula de interés [48].

Otra alternativa de conjugación es la terapia con profármacos de enzimas dirigida por anticuerpos (ADEPT, por sus siglas en inglés). Así, pueden activarse determinadas toxinas, fármacos y radioisótopos capaces de reconocer las células tumorales [47, 49].

Como complemento, mediante técnicas de ingeniería genética se ha logrado disponer de anticuerpos artificiales, adquiriendo la capacidad de unirse a dos epítopos en el mismo o en distintos antígenos. El reconocimiento de ambos objetivos funciona como mediador para el redireccionamiento de las células del sistema inmune, como las NK y las T. Adicionalmente, pueden modificar las señalizaciones moleculares, inactivando la proliferación celular o las vías inflamatorias [50].

Existen dos categorías de anticuerpos monoclonales biespecíficos a nivel estructural. Un grupo se acerca a una IgG con una región Fc, incorporando la función de citotoxicidad celular dependiente de anticuerpos (ADCC, por sus siglas en inglés) y la citotoxicidad dependiente de complemento (CDC). El segundo grupo consiste en estructuras más pequeñas. Cuentan con dominios de unión a antígeno minimizados, en los cuales se eliminó la porción Fc. Debido a ello, sus vidas medias son más cortas y tienen mayor toxicidad [50].

Inmunoterapia

La inmunoterapia empezó cuando William Coley, en 1891, trató de estimular el sistema inmune inyectando *Streptococcus pyogenes* y *Serratia marcescens* inactivados para mejorar la condición de un paciente con cáncer [52]. En la actualidad, es uno de los pilares para tratarlo, modulando la actividad de este sistema e induciendo un retroceso tumoral duradero [52].

El cáncer puede presentar tres tipos de fisiopatología dependiendo de la respuesta inmune [51]. Estas posibilidades junto con las estrategias con las cuales dispone la inmunoterapia para combatirlos se describen en el cuadro 4.

Cuadro 4. Fisiopatología del cáncer y sus respectivas estrategias inmunoterapéuticas [52].

Fisiopatología	Estrategia inmunoterapéutica
Inmunogénica: expresión de antígenos inmunogénicos, activación de células T antitumorales e inducción de anticuerpos.	Uso de fármacos para el bloqueo de puntos de control de la inmunidad.
Inflamatoria: alta producción de moléculas inflamatorias, proangiogénicas e inmunosupresoras, incremento en la frecuencia y actividad supresora de MDSCs y células Treg.	Uso de antiangiogénicos, anticuerpos que bloqueen el TGF-β y fármacos de bloqueo de puntos de control de la inmunidad.
Escapatoria: pobre activación inmune y producción de citoquinas.	Anticuerpos específicos contra antígenos tumorales.

A continuación se mencionan algunos anticuerpos monoclonales en investigación para el tratamiento del cáncer de páncreas, relacionados con la inmunidad activa. Su intención es el estímulo del sistema inmune para atacar las células tumorales [53].

Antígeno 4 del linfocito T citotóxico (CTLA-4)

El antígeno 4 del linfocito T citotóxico (CTLA-4, por sus siglas en inglés) y la proteína 1 de muerte celular programada (PD-1, por sus siglas en inglés) son moléculas inhibitoras de la superficie de las células T. Atenúan una variedad de las funciones de los linfocitos T activos, incluidas la proliferación celular, la secreción de citocinas y la citólisis. En enfermedades oncológicas, se ha demostrado que las células tumorales y las infiltrantes de tumores expresan ligandos para estos receptores que permiten la evasión de la inmunovigilancia [54, 55].

CTLA-4 inhibe las respuestas de las células T por medio de mecanismos intrínsecos y extrínsecos. En cuanto al intrínseco, su participación a través de los ligandos B7 conduce a una regulación negativa de la activación de estos linfocitos. Como complemento, de forma extrínseca se encuentra la capacidad de las células que lo expresan de competir con CD28 por los ligandos B7 o la eliminación transendocítica de ligandos coestimuladores de APC. Además, es fundamental para la labor de las células Treg, esenciales para suprimir la autoinmunidad y para mantener la auto tolerancia. En contraposición, su bloqueo ha inducido la actividad antitumoral en modelos animales de cáncer [54, 56].

Ipilimumab es un anticuerpo monoclonal humano IgG1 dirigido contra CTLA-4, el cual media remisiones duraderas en pacientes con melanoma avanzado. Estudios clínicos recientes han identificado una reducción en las células Treg infiltrantes de tumores después del tratamiento con este fármaco y los estudios *in vitro* señalan que agota las células Treg que lo expresan [57]. Actualmente, se han realizado estudios clínicos de fases II y III, en los cuales se ha estudiado solo o en combinación con diversas terapias [55, 56].

Otro anticuerpo contra este receptor es tremelimumab. Ha mostrado actividad en estudios de fase temprana. Para su desarrollo, se seleccionó un isotipo IgG2 humano para minimizar la actividad potencial de ADCC. El bloqueo de la regulación negativa asociada a CTLA-4 para la activación de células T incrementó la respuesta inmune y la actividad antitumoral [57, 58].

Proteína 1 de muerte celular programada (PD-1) y su ligando (PD-L1)

PD-1 se expresa mayoritariamente en células T activadas. Transmite señales inhibitorias a ellas después de unirse con sus ligandos PD-L1 y PD-L2 en células neoplásicas y en el microambiente tumoral. PD-L1 puede unirse a CD80/B7-1, promoviendo tolerancia inmunológica [54, 59].

La expresión persistente de PD-1 está altamente asociada con tumores. Debido a ello, los anticuerpos anti PD-1 y anti PD-L1 han mostrado actividad antitumoral en algunos modelos. Por ello, su bloqueo terapéutico puede mejorar la eficacia de los efectos de los linfocitos T y revertir su inhibición [54, 60].

Entre los fármacos se tiene el nivolumab. Es un anticuerpo monoclonal humano IgG4 que se une con gran afinidad al receptor PD-1 [55]. Está aprobado por la FDA para el tratamiento de melanoma, cáncer de pulmón de células no pequeñas, carcinoma de células renales, linfoma de Hodgkin, cáncer de cabeza y cuello, carcinoma urotelial y carcinoma hepatocelular [60].

Por su parte, el pembrolizumab es un anticuerpo monoclonal humanizado IgG4k anti-PD1. Su unión no compromete a los receptores Fc, ni activa el complemento, careciendo de actividad citotóxica [61].

Por su parte, el durvalumab es un anticuerpo monoclonal humano IgG1 aprobado para el carcinoma urotelial de segunda línea y el cáncer de pulmón en estadio III (no resectable) que no ha progresado después de la quimioterapia basada en platino y la radioterapia. Bloquea el PD-L1 y sus receptores, pudiendo aliviar los efectos inmunosupresores dependientes de su interacción, potenciando la actividad citotóxica de las células T antitumorales [58].

Finalmente, atezolizumab es un anticuerpo humano IgG1 que bloquea la interacción de PD-L1 con PD-1 y B7 [62].

Aunque el bloqueo de PD-1 ha logrado cierto éxito como monoterapia, las respuestas no son efectivas o sostenidas en un subconjunto de pacientes con cáncer. Los problemas por resolver son la identificación del mecanismo de falta de respuesta a la terapia y el desarrollo de opciones combinadas basadas en diversos mecanismos [60].

En cuanto al cáncer de páncreas, el desafío inmunoterapéutico se debe a la presencia de una cápsula fibrosa gruesa con estroma desmoplásico intenso capaz de contrarrestar la entrada de células inmunes. Asimismo, el medio tumoral pancreático tiene una preponderancia de células Treg, MDSCs y macrófagos M2, contribuyendo al microambiente inmunosupresor [63]. Igualmente, tiende a producir IL-10 (citoquina antiinflamatoria que juega un papel importante en la regulación negativa de la respuesta inmune) [64], TGF- β (citocina esencial para la inducción de la respuesta fibrótica y para la activación del estroma del cáncer) [65] y una mayor expresión de PD-L1, impidiendo la activación de las células T específicas contra antígenos tumorales [63].

Cabe resaltar que los mecanismos de acción de los anticuerpos monoclonales anti-PD-L1 y anti-CTLA-4 no son redundantes. Su combinación puede tener actividad aditiva o sinérgica. Ejemplo de ello es la utilización de durvalumab con tremelimumab, mostrándose una mayor actividad en ciertos tipos de tumores [58].

Otros mecanismos de acción

Las células cancerígenas emplean varios mecanismos para escapar de la respuesta inmune, siendo uno la generación de adenosina. Su sobreexpresión se ha asociado con el desarrollo de cáncer y un mal pronóstico, porque tiene actividad inmunosupresora, inhibiendo la proliferación y la función de células inmunes, principalmente linfocitos T. Adicionalmente, promueve la proliferación de células cancerosas, angiogénesis y metástasis. Todas estas funciones están mediadas por receptores localizados en la expresión superficial de CD73. En consecuencia, es un objetivo inmunoterapéutico para su tratamiento [66].

Aunque los estudios en animales han brindado resultados prometedores, la evidencia en cáncer humano es poca. Ante esto, hay grupos de investigación trabajando para esclarecer la seguridad y la eficacia de los inhibidores dirigidos a CD73 mediante ensayos clínicos [66].

Oleclumab es un anticuerpo monoclonal IgG1 λ humano desarrollado contra el receptor CD73. Se está investigando para el tratamiento de ciertos tipos de cáncer, incluido el de páncreas [67].

Actúa contra la enzima CD73, uniéndose selectivamente e inhibiendo su actividad ectonucleotidasa, haciendo que se agrupen los receptores y sean internalizados. De esta forma, se evita la supresión de linfocitos mediada por adenosina y aumenta la actividad de las células efectoras CD8+. Además permite la activación de macrófagos, así como la reducción de MDSCs y células Treg. Otro efecto es la agrupación y la internalización de CD73, reduciendo la migración de las células cancerosas y previniendo la metástasis [67].

Otra molécula de interés es la de adhesión celular epitelial (EpCAM, por sus siglas en inglés) (CD326). Se trata de una glicoproteína transmembrana de tipo I que funciona como una molécula de adhesión celular específica del epitelio. Está involucrada en una serie de procesos, incluida la migración celular, la proliferación y la diferenciación. La creación de anticuerpos capaces de unirse simultáneamente a objetivos en las células tumorales e inmunes han abierto las puertas a nuevos tratamientos. Actualmente, se están desarrollando terapias anticancerígenas dirigidas contra EpCAM, incluyendo anticuerpos biespecíficos. Esta proteína se expresa en la gran mayoría de pacientes con cánceres epiteliales, como los tumores de ovario, gástrico, colorrectal, pancreático, de mama, de pulmón y endometrial [68, 69, 70].

Catumaxomab es un anticuerpo monoclonal biespecífico que reconoce EpCAM y el CD3 del complejo receptor de células. Consiste en una IgG2a murina asociada con el segmento Fab anti-EpCAM y una IgG2b de rata asociada con el segmento Fab anti-CD3. Ambas subclases de IgG fueron seleccionadas por su alta afinidad de unión a los receptores Fc γ humanos. Este dominio funcional de Fc activa las células inmunes positivas para los receptores Fc γ I, Fc γ IIa y

Fcγ III presentes en células NK y macrófagos. Por lo tanto, se ha definido como un anticuerpo trifuncional, debido a su capacidad de yuxtaponer simultáneamente poblaciones de células inmunes efectoras que expresan FcγR, junto con los linfocitos T, con células tumorales [68, 69, 70].

Finalmente, otro receptor es el factor estimulante de colonias de macrófagos 1 (CSF-1, por sus siglas en inglés). El cabiralizumab es un anticuerpo monoclonal dirigido a él. Se tiene información sobre terapias combinadas con nivolumab [71, 72]. Sin embargo, los resultados no han sido alentadores en cáncer pancreático [73].

Finalmente, en el cuadro 5 se pueden observar los estudios clínicos que se están realizando o se han efectuado con anticuerpos monoclonales a junio de 2020 para el tratamiento del cáncer de páncreas [74]. Se encontraron 227 resultados, la mayoría de los cuales corresponden a terapias combinadas, donde se dispone de dos o más anticuerpos monoclonales con distintos mecanismos. La investigación para esta patología es bastante reciente, dado que todos se hallan en fase I o II. Asimismo, la mayoría de estudios están relacionados con el receptor PD-1, teniendo al nivolumab y al pembrolizumab con mayor presencia.

Cuadro 5. Estudios clínicos relacionados con anticuerpos monoclonales para el tratamiento del cáncer de páncreas [74].

Anticuerpo monoclonal	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
Atezolizumab	7	5	0	0
Avelumab	5	8	0	0
Cabiralizumab	1	3	0	0
Catumaxomab	0	0	0	0
Durvalumab	13	14	0	0
Ipilimumab	10	13	0	0
Nivolumab	24	30	0	0
Oleclumab	1	2	0	0
Pembrolizumab	29	27	0	0
Tremelimumab	5	30	0	0
TOTAL	95	132	0	0

Conclusiones

El cáncer de páncreas es una enfermedad letal, cuyo diagnóstico es tardío. Su desarrollo está ligado en gran parte al protooncogen K-Ras, manifestado en alrededor del 90 % de los casos. A nivel global, es el sexto cáncer más mortal, y en Costa Rica se ubica en la séptima posición. El diagnóstico se realiza mediante biomarcadores como el CA 19-9 y el CEA, en conjunto con otras técnicas.

Existen regímenes de terapias para el tratamiento farmacológico como el FOLFIRINOX. Otras opciones terapéuticas son la radioterapia y la cirugía. No obstante, menos del 20 % de los adenocarcinomas son admisibles para cirugía.

Ante esta situación, el uso de anticuerpos monoclonales ofrece alternativas para su manejo por medio de la inmunoterapia activa. En este momento, se encuentran en fase de investigación varias moléculas (atezolizumab, avelumab, cabiralizumab, catumaxomab, durvalumab, ipilimumab, nivolumab, oleclumab, pembrolizumab, tremelimumab), en estudios clínicos de fases I y II. Gran

parte de ellos se están evaluando en combinación con otros fármacos, pues estas terapias no son redundantes, ni se antagonizan. Por el contrario, han mostrado tener una acción sinérgica. Los resultados sobre estos ensayos son escasos, pero se espera que a futuro se disponga de mayor información, junto con un número creciente de opciones que permitan en el mediano plazo su disponibilidad como alternativas terapéuticas para mejorar la esperanza y la calidad de vida de las personas que lo padecen.

Referencias

- [1] C. Boticario Boticario y M. Cascales Angosto, *Innovaciones en Cáncer*. San José, Costa Rica: Editorial UNED, 2008.
- [2] J. Iglesias-García, J. Lariño Noia y J. E. Domínguez Muñoz, "Cáncer de páncreas," *Medicine*, vol. 11, no. 8, pp. 473-480, 2012.
- [3] J. Kleeff, M. Korc, M. Apte, C. La Vecchia, C. D. Johnson, A. V. Biankin *et al.*, "Pancreatic cancer," *Nature Reviews Disease Primers*, vol. 2, 16022, 2016.
- [4] A. M. Jiménez Gordo, M. López Gómez, E. Casado y R. Molina, "Actualización en cáncer de páncreas y de vías biliares," *Medicine*, vol. 12, no. 32, pp. 1919-1928, 2017.
- [5] T. Conroy, P. Hammel, M. Hebbar, M. Ben Abdelghani, A. C. Wei, J. L. Raoul *et al.*, "FOLFIRINOX or Gemcitabine as Adjuvant Therapy for Pancreatic Cancer," *New England Journal of Medicine*, vol. 379, no. 25, pp. 2395-2406, 2018.
- [6] S. Elnemr, A. A. E. A. Sultan, and S. M. S. Nassar, "Recent Advances and Surgical Applications of Monoclonal Antibodies," *The Egyptian Journal of Hospital Medicine*, vol. 77, no. 5, pp. 5668-5678, 2019.
- [7] S. K. Dougan, "The Pancreatic Cancer Microenvironment," *The Cancer Journal*, vol. 23, no. 6, pp. 321-325, 2017.
- [8] E. A. Collisson, A. Sadanandam, P. Olson, W. J. Gibb, M. Truitt, S. Gu *et al.*, "Subtypes of pancreatic ductal adenocarcinoma and their differing responses to therapy," *Nature Medicine*, vol. 17, no. 4, pp. 500-503, 2011.
- [9] A. A. T. Naqvi, G. M. Hasan, and M. I. Hassan, "Investigating the role of transcription factors of pancreas development in pancreatic cancer," *Pancreatology*, vol. 18, no. 2, pp. 184-190, 2018.
- [10] Sociedad Americana de Oncología Clínica. 2018. Cáncer de páncreas: Estadios [En línea]. Disponible en: <https://www.cancer.net/es/tipos-de-cancer/cancer-de-pancreas/estadios>
- [11] I. A. Batista and S. A. Melo, "Exosomes and the Future of Immunotherapy in Pancreatic Cancer," *International Journal of Molecular Science*, vol. 20, no. 3, 567, 2019.
- [12] D. Díaz Martín, A. Prieto Martín, J. Monserrat Sanz, M. A. Sánchez Luengo y M. Álvarez-Mon Soto, "Sistema inmune y cáncer," *Medicine*, vol. 10, no. 28, pp. 1900-1908, 2009.
- [13] J. I. Lizarazo Rodríguez, "Patogénesis del cáncer de páncreas," *Revista Colombiana de Gastroenterología*, vol. 23, no. 4, pp. 391-399, 2008.
- [14] V. Asati, D. K. Mahapatra, and S. K. Bharti, "K-Ras and its inhibitors towards personalized cancer treatment: Pharmacological and structural perspectives," *European Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 125, pp. 299-314, 2017.
- [15] F. Kopp, E. Wagner, and A. Roidl, "The proto-oncogene KRAS is targeted by miR-200c," *Oncotarget*, vol. 5, no. 1, pp. 185-195, 2014.
- [16] P. Carvallo, "Conceptos sobre Genética Humana para la Comprensión e Interpretación de las Mutaciones en Cáncer y otras Patologías Hereditarias," *Revista Médica Clínica Las Condes*, vol. 28, no. 4, pp. 531-537, 2017.
- [17] M. Roser and H. Ritchie. 2019. Cancer [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/cancer#citation>
- [18] R. L. Siegel, K. D. Miller, and A. Jemal, "Cancer Statistics, 2020," *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, vol. 70, no. 1, pp. 7-30, 2020.
- [19] C. Caglevic, J. Gallardo, M. de la Torre, M. Mahave, B. Müller, S. Solé *et al.*, "Recomendaciones sobre el manejo del cáncer de páncreas tipo adenocarcinoma en Latinoamérica: Reunión del Consenso del Simposio Latinoamericano de Gastroenterología Oncológica (SLAGO) y de la Asociación Ibero Latinoamericana de Terapia Radiante (ALATRO), Viña del Mar, Chile 2015," *Revista Médica de Chile*, vol. 144, no. 10, pp. 1305-1318, 2016.

- [20] E. O. Chielle y V. A. Kuiava, "Epidemiología do Câncer de Pâncreas na Região Sul do Brasil: Estudo da Base de Dados do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (Datatus)," *Revista de Atenção à Saúde*, vol. 16, no. 56, pp. 32-39, 2018.
- [21] C. Bosetti, P. Bertuccio, E. Negri, C. La Vecchia, M. P. Zeegers, and P. Boffetta, "Pancreatic Cancer: Overview of Descriptive Epidemiology," *Molecular Carcinogenesis*, vol. 51, no. 1, pp. 3-13, 2012.
- [22] Ministerio de Salud de Costa Rica. 2016. Incidencia 2014 Diferentes Características [En línea]. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/vigilancia-de-la-salud/estadisticas-y-bases-de-datos/estadisticas/estadistica-de-cancer-registro-nacional-tumores/incidencia>
- [23] Ministerio de Salud de Costa Rica. 2016. Mortalidad por Tumores Malignos más Frecuentes en Mujeres y en Hombres por Cantón 2015 [En línea]. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/vigilancia-de-la-salud/estadisticas-y-bases-de-datos/estadisticas/estadistica-de-cancer-registro-nacional-tumores/mortalidad>
- [24] P. A. López Penza y L. Ruso Martínez, "Cáncer de páncreas: Epidemiología de su mal pronóstico," *Revista Médica del Uruguay*, vol. 33, no. 3, pp. 180-186, 2017.
- [25] A. López Serrano, "Factores de riesgo y diagnóstico temprano del cáncer de páncreas," *Gastroenterology & Hepatology*, vol. 33, no. 5, pp. 382-390, 2010.
- [26] A. Pacheco Mejías, "Cáncer de páncreas, un reto al sistema sanitario," *Revista Archivo Médico de Camagüey*, vol. 22, no. 5, pp. 847-876, 2018.
- [27] I. Hermida Lazcano, E. Sánchez Tejero, C. Nerín Sánchez, R. Cordero Bernabé, I. Mora Escudero y J. Pinar Sánchez, "Marcadores Tumorales," *Revista Clínica Médica Familiar*, vol. 9, no. 1, pp. 31-42, 2016.
- [28] G. Campuzano Maya, "Utilidad clínica de los marcadores tumorales," *Medicina & Laboratorio*, vol. 16, no. 9-10, pp. 411-445, 2010.
- [29] J. F. Aragón Sánchez, R. Martínez Macias, F. Rico Morlan, R. Barra Martínez, L. Díaz Rodríguez y J. M. de la Garza, "Niveles séricos de CA 19-9 como predictor de la reseccabilidad quirúrgica en adenocarcinoma de páncreas," *Gaceta Mexicana de Oncología*, vol. 6, no. 3, pp. 59-64, 2007.
- [30] J. Jans, M. J. Talma, M. Almonacid, J. Cruz, M. Cáceres, C. Rosenfeld *et al.*, "Rendimiento diagnóstico del marcador tumoral CA 19-9 en la diferenciación entre patología bilio-pancreática benigna y maligna," *Revista Chilena de Cirugía*, vol. 65, no. 4, pp. 307-314, 2013.
- [31] M. de Santibañes y O. M. Mazza, "Manejo actual del cáncer de páncreas," *Revista del Hospital Italiano de Buenos Aires*, vol. 33, no. 1, pp. 13-17, 2013.
- [32] S. Sánchez Cabús y L. Fernández-Cruz, "Cirugía del cáncer de páncreas: estrategias quirúrgicas según los datos basados en la evidencia," *Cirugía Española*, vol. 93, no. 7, pp. 432-435, 2015.
- [33] J. Busquets, J. Fabregat, R. Jorba, N. Peláez, F. García-Borobia, C. Masuet *et al.*, "Tratamiento quirúrgico del adenocarcinoma pancreático mediante duodenopancreatectomía cefálica (Parte 1): Complicaciones postoperatorias en 204 casos en un centro de referencia," *Cirugía Española*, vol. 88, no. 5, pp. 299-307, 2010.
- [34] J. Fabregat, J. Busquets, N. Peláez, R. Jorba, F. García-Borobia, C. Masuet *et al.*, "Tratamiento quirúrgico del adenocarcinoma pancreático mediante duodenopancreatectomía cefálica (Parte 2): Seguimiento a largo plazo tras 204 casos," *Cirugía Española*, vol. 88, no. 6, pp. 374-382, 2010.
- [35] E. Buc y A. Sauvanet, "Duodenopancreatectomía cefálica," *EMC - Técnicas Quirúrgicas - Aparato Digestivo*, vol. 28, no. 1, pp. 1-25, 2012.
- [36] National Comprehensive Cancer Network, *NCCN Guidelines for Patients: Pancreatic Cancer*. Pensilvania, Estados Unidos: National Comprehensive Cancer Network, 2019.
- [37] Wolters Kluwer. 2020. UpToDate [En línea]. Disponible en: <https://www.uptodate.com/home>
- [38] Instituto Nacional del Cáncer. 2019. Inmunoterapia para tratar el cáncer [En línea]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/tratamiento/tipos/inmunoterapia>
- [39] S. Alonso Castellanos, M. Soto Célix, J. Alonso Galarreta, A. del Riego Valledor y A. Miján de la Torre, "Efectos adversos metabólicos y nutricionales asociados a la terapia biológica del cáncer," *Nutrición Hospitalaria*, vol. 29, no. 2, pp. 259-268, 2014.
- [40] S. E. García Ramos, P. García Poza y F. Ramos Díaz, "Utilización terapéutica de los anticuerpos monoclonales," *Ars Pharmaceutica*, vol. 52, no. 3, pp. 46-57, 2011.
- [41] J. D. Dimitrov, "Harnessing the Therapeutic Potential of 'Rogue' Antibodies," *Trends in Pharmacological Sciences*, vol. 41, no. 6, pp. 409-417, 2020.

- [42] N. P. Machado, G. A. Tellez y J. C. Castaño, "Anticuerpos monoclonales: desarrollo físico y perspectivas terapéuticas," *Infectio*, vol. 10, no. 3, pp. 186-197, 2006.
- [43] H. A. Parray, S. Shukla, S. Samal, T. Shrivastava, S. Ahmed, C. Sharma *et al.*, "Hybridoma technology a versatile method for isolation of monoclonal antibodies, its applicability across species, limitations, advancement and future perspectives," *International Immunopharmacology*, vol. 85, 106639, 2020.
- [44] A. García Merino, "Anticuerpos monoclonales: Aspectos básicos," *Neurología*, vol. 26, no. 5, pp. 301-306, 2011.
- [45] A. González-Fernández y F. Díaz de Espada, "César Milstein: 35 años de anticuerpos monoclonales," *Inmunología*, vol. 30, no. 1, pp. 30-33, 2011.
- [46] B. Casanova Estruch, "Perfil de seguridad y aspectos prácticos a tener en cuenta en la administración de anticuerpos monoclonales," *Neurología*, vol. 28, no. 3, pp. 169-178, 2013.
- [47] N. Gutiérrez Rodríguez, "La Inmunoterapia con Anticuerpos Monoclonales y sus Derivados," Trabajo Fin de Grado, Facultad de Medicina, Universidad de Cantabria, Santander, España, 2016.
- [48] E. Hernández Baltazar y J. González Christen, "Conjugados Anticuerpo-Fármaco: El estado de arte," *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, vol. 42, no. 3, 7-16, 2011.
- [49] S. K. Sharma and K. D. Bagshawe, "Antibody Directed Enzyme Prodrug Therapy (ADEPT): Trials and tribulations," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 118, pp. 2-7, 2017.
- [50] K. Bermúdez Carvajal, G. Hidalgo Carrillo, R. Mora Mata, K. Rodríguez Mora, B. Ysmael-Acle Sánchez y J. J. Mora Román, "Anticuerpos Monoclonales Biespecíficos: Desarrollo, Producción y Uso como Terapia Anticancerígena," *Revista Médica de la Universidad de Costa Rica*, vol. 13, no. 1, pp. 11-29, 2019.
- [51] N. G. Rincon-Silva, E. Y. Jimenez-Vergara y J. D. Rincon Silva, "Inmunoterapia aplicada para el tratamiento de cáncer mediante vacunas desarrolladas con biomateriales," *Revista Cubana de Química*, vol. 32, no. 1, pp. 20-44, 2020.
- [52] L. Vasquez, D. Castro, J. de León y B. Beltrán, "Inmunoterapia en Cáncer: De los Inicios al Premio Nobel," *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, vol. 37, no. 1, pp. 115-121, 2020.
- [53] H. Zhang and J. Chen, "Current status and future directions of cancer immunotherapy," *Journal of Cancer*, vol. 9, no. 10, pp. 1773-1781, 2018.
- [54] M. J. Selby, J. J. Engelhardt, R. J. Johnston, L. S. Lu, M. Han, K. Thudium *et al.*, "Preclinical Development of Ipilimumab and Nivolumab Combination Immunotherapy: Mouse Tumor Models, In Vitro Functional Studies, and Cynomolgus Macaque Toxicology," *PLoS One*, vol. 11, no. 9, e0161779, 2016.
- [55] N. A. Carreau and A. C. Pavlick, "Nivolumab and ipilimumab: immunotherapy for treatment of malignant melanoma," *Future Oncology*, vol. 15, no. 4, pp. 349-358, 2019.
- [56] D. T. Le, E. Lutz, J. N. Uram, E. A. Sugar, B. Onners, S. Solt *et al.*, "Evaluation of Ipilimumab in Combination With Allogeneic Pancreatic Tumor Cells Transfected With a GM-CSF Gene in Previously Treated Pancreatic Cancer," *Journal of Immunotherapy*, vol. 36, no. 7, pp. 382-389, 2013.
- [57] F. Arce Vargas, A. J. S. Furness, K. Litchfield, K. Joshi, R. Rosenthal, E. Ghorani *et al.*, "Fc Effector Function Contributes to the Activity of Human Anti-CTLA-4 Antibodies," *Cancer Cell*, vol. 33, no. 4, pp. 649-663, 2018.
- [58] E. M. O'Reilly, D. Y. Oh, N. Dhani, D. J. Renouf, M. A. Lee, W. Sun *et al.*, "Durvalumab With or Without Tremelimumab for Patients With Metastatic Pancreatic Ductal Adenocarcinoma: A Phase 2 Randomized Clinical Trial," *JAMA Oncology*, vol. 5, no. 10, 1431-1438, 2019.
- [59] Z. Y. Xu-Monette, J. Zhou, and K. H. Young, "PD-1 expression and clinical PD-1 blockade in B-cell lymphomas," *Blood*, vol. 131, no. 1, pp. 68-83, 2018.
- [60] G. Ding, T. Shen, C. Yan, M. Zhang, Z. Wu, and L. Cao, "IFN- γ down-regulates the PD-1 expression and assist nivolumab in PD-1-blockade effect on CD8+ T-lymphocytes in pancreatic cancer," *BMC Cancer*, vol. 19, no. 1, 1053, 2019.
- [61] G. Kwok, T. C. C. Yau, J. W. Chiu, E. Tse, and Y. L. Kwong, "Pembrolizumab (Keytruda)," *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, vol. 12, no. 11, pp. 2777-2789, 2016.
- [62] B. A. Inman, T. A. Longo, S. Ramalingam, and M. R. Harrison, "Atezolizumab: A PD-L1-Blocking Antibody for Bladder Cancer," *Clinical Cancer Research*, vol. 23, no. 8, pp. 1886-1890, 2017.
- [63] B. P. Venkatesulu, C. E. Hsieh, K. L. Sanders, and S. Krishnan, "Recent advances in radiation therapy of pancreatic cancer," *F1000Research*, vol. 7, no. F1000 Faculty Rev, 1931, 2018.
- [64] S. Rutz and W. Ouyang, "Regulation of Interleukin-10 Expression," in *Regulation of Cytokine Gene Expression in Immunity and Diseases*, X. Ma, Ed. Dordrecht: Springer, 2016, pp. 89-116.

- [65] L. Caja, F. Dituri, S. Mancarella, D. Caballero-Diaz, A. Moustakas, G. Giannelli *et al.*, "TGF- β and the Tissue Microenvironment: Relevance in Fibrosis and Cancer," *International Journal of Molecular Science*, vol. 19, no. 5, 1294, 2018.
- [66] F. Jadidi-Niaragh, "Potential of CD73 as a target for cancer immunotherapy," *Immunotherapy*, vol. 11, no. 16, pp. 1353-1355, 2019.
- [67] Creative Biolabs. 2020. Oleclumab Overview [En línea]. Disponible en: <https://www.creativebiolabs.net/oleclumab-overview.htm>
- [68] M. Fossati, A. Buzzonetti, G. Monego, V. Catzola, G. Scambia, A. Fattorossi *et al.*, "Immunological changes in the ascites of cancer patients after intraperitoneal administration of the bispecific antibody catumaxomab (anti-EpCAM \times anti-CD3)," *Gynecologic Oncology*, vol. 138, no. 2, pp. 343-351, 2015.
- [69] M. A. Ströhlein, F. Lordick, D. Rüttinger, K. U. Grützner, O. C. Schemanski, M. Jäger *et al.*, "Immunotherapy of Peritoneal Carcinomatosis with the Antibody Catumaxomab in Colon, Gastric, or Pancreatic Cancer: An Open-Label, Multicenter, Phase I/II Trial," *Onkologie*, vol. 34, no. 3, pp. 101-108, 2011.
- [70] D. Seimetz, H. Lindhofer, and C. Bokemeyer, "Development and approval of the trifunctional antibody catumaxomab (anti-EpCAM \times anti-CD3) as a targeted cancer immunotherapy," *Cancer Treatment Reviews*, vol. 36, no. 6, pp. 458-467, 2010.
- [71] K. E. Dickinson, L. Price, K. A. Wanat, and B. L. Swick, "Dermal elastolysis in the setting of combination immunotherapy," *Journal of Cutaneous Pathology*, vol. 46, no. 9, pp. 684-687, 2019.
- [72] A. Smith. 2020. Opdivo, cabiralizumab combo falls short in pancreatic cancer [En línea]. Disponible en: http://www.pharmatimes.com/news/opdivo,_cabiralizumab_combo_falls_short_in_pancreatic_cancer_1326477
- [73] S. Das, J. Berlin, and D. Cardin, "Harnessing the Immune System in Pancreatic Cancer," *Current Treatment Options in Oncology*, vol. 19, no. 10, pp. 48, 2018.
- [74] U. S. National Library of Medicine. 2020. Clinical Trials [En línea]. Disponible en: <https://clinicaltrials.gov>

Características y enfoques de los proyectos sobre cambio climático en Costa Rica de 2011 a 2022

Characterizations and approaches of climate change in Costa Rica from 2011 to 2022

Melissa Marín-Cabrera¹

Fecha de recepción: 6 de junio de 2021
Fecha de aprobación: 18 de octubre de 2021

Marín-Cabrera, M. Características y enfoques de los proyectos sobre cambio climático en Costa Rica de 2011 a 2022. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 35-47.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5750>

¹ Bióloga. Dra. en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (hasta 2018). Costa Rica.
Correo electrónico: mmarincr@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8696-932X>

Palabras clave

Mapeo; ecosistemas; recurso hídrico; capacidades; seguridad alimentaria.

Resumen

Con el fin de contribuir a una mejor toma de decisiones para enfrentar el cambio climático, la UICN analizó 43 proyectos sobre cambio climático en Costa Rica cuyo periodo de ejecución va del 2012 a 2022. Los resultados muestran la tendencia a enfocar esfuerzos en el fortalecimiento de capacidades, luego en la protección y recuperación de ecosistemas, seguidamente en el recurso hídrico (tema transversal) y en menor medida, en la seguridad alimentaria. La mayor parte fueron implementados por Organizaciones No Gubernamentales (ONG) y los organismos internacionales quienes manejan en gran parte los presupuestos asociados a este tema. La mayor inversión se dio en las provincias costeras. Se identificaron cinco retos para aumentar la contribución de los proyectos a la disminución de las vulnerabilidades climáticas: fortalecer las capacidades locales y los mecanismos de gobernanza en la gestión; hacer más directa la participación comunitaria; aumentar los esfuerzos en seguridad alimentaria (tema clave además por las vulnerabilidades profundizadas por la pandemia del COVID19); incorporar la gestión del riesgo como un eje estratégico; y dar prioridad al monitoreo para generar evidencia científica sobre los avances e impactos.

Keywords

Mapping; ecosystems; water resources; capacities; food security.

Abstract

IUCN analyzed 43 projects related to climate change implemented in Costa Rica from 2012 to 2022 as a contribution to improve decision making to face climate change. The results show a strong tendency to focus efforts in strengthening of capacities, the protection and restoration of ecosystems, water resources management (a cross-cutting issue) and finally, food security. Non-Governmental Organizations (NGOs) were the major implementing organizations, but the international organizations managed the largest amount of budget. The largest economic investment of these initiatives was in coastal provinces. Five challenges were identified to increase the contribution of projects to the reduction of climate vulnerabilities: strengthening local capacities and governance mechanisms in project management; improve more direct community participation; increase efforts in food security (key issue also given the vulnerabilities deepened by the COVID19 pandemic); include risk management as a strategic theme; and prioritize monitoring to generate scientific evidence on progress and impacts.

Introducción

En los últimos años, especialmente a partir de la difusión del cuarto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) [1], ha habido una creciente toma de conciencia por parte de la sociedad civil y de las agencias gubernamentales de América Latina sobre la amenaza del cambio climático para los sistemas humanos y naturales [2]. El acuerdo de París y su principal instrumento, las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC) [3], son, desde el 2016, mecanismos políticos, jurídicos y financieros de escala mundial que se establecen con el fin de intensificar las acciones e inversiones para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos.

Para el caso de Costa Rica, la actualización de su Contribución Nacionalmente Determinada se presentó en 2020 y en este documento, el país apuesta por un mayor compromiso al proponer acciones para limitar el incremento de la temperatura media global de 2°C a 1.5°C [4]. Lo anterior está sustentado por la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica [5] y por el Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050 [6].

La reducción de los efectos negativos del cambio climático puede ser abordado desde varios enfoques, entre ellos el de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) que son medidas dirigidas a proteger, gestionar y restaurar de manera sostenible ecosistemas naturales o modificados para hacer frente a retos de la sociedad de forma efectiva y adaptable, proporcionando simultáneamente bienestar humano y beneficios de la biodiversidad [7].

La Adaptación Basada en Ecosistemas (AbE) es parte de las SbN y se define como: "una combinación de políticas que tiene el potencial de, mientras se adapta al cambio climático, impulsar transiciones hacia la sostenibilidad" [8], incluye la conservación, la restauración de los ecosistemas y el uso sostenible del entorno natural [9].

El enfoque de SbN integra ocho criterios: desafíos sociales, diseño adaptado a la dimensión, ganancia neta en términos de biodiversidad e integridad de ecosistemas, viabilidad económica, gobernanza inclusiva, equilibrio entre objetivos y beneficios, gestión adaptativa, y, sostenibilidad [10]. Entre los desafíos se consideran la seguridad alimentaria e hídrica, la salud humana, el riesgo de desastres y el desarrollo social y económico [11].

Las SbN tienen un coste menor -a igualdad de carbono secuestrado- que otras medidas de captura de carbono para reducir los efectos del cambio climático [11] y se estima que pueden aportar el 37% de la mitigación de dióxido de carbono necesaria hasta 2030 para tener una probabilidad superior al 66% de mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C [12].

A pesar de estos beneficios, los resultados de la implementación de las SbN aún no han sido suficientes para reducir significativamente los efectos del cambio climático y se requieren más esfuerzos globales en este sentido. Por ejemplo, a pesar de que a nivel mundial en 2020 la tasa de deforestación disminuyó un tercio en relación con el decenio anterior y ha habido una expansión de al menos del 10 al 15% en 10 años de áreas protegidas [13], el cambio climático continúa siendo uno de los impulsores directos del cambio en la naturaleza, siendo el tercero en importancia de un total de los cinco priorizados por la Plataforma Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas [14].

En el caso de Costa Rica, aunque sus avances en la lucha contra el cambio climático han sido ampliamente reconocidos, este tema continúa siendo una de las 5 principales amenazas para la biodiversidad en el país [15]. Si bien lo anterior es consecuencia de múltiples razones de índole político, económico y social, es clave resaltar la urgente necesidad de incorporar criterios climáticos en la planificación territorial a través de sistemas de gobernanza climática eficientes.

El papel de los gobiernos locales es clave en este sentido, pero el cambio climático no es un tema siempre vinculante para estos [16]. Por ejemplo, en el año 2019, el cambio climático, ocupó la octava prioridad (de diez) para los gobiernos locales, esto en parte porque solo el 44% de las municipalidades (de las 63 consultadas) destinaron recursos para atenderlo [17]. En 2020, el 65% de los municipios no habían incorporado la variable ambiental en la planificación del territorio, lo que aumenta su vulnerabilidad ante el cambio climático [18].

Lo anterior se suma al vacío existente en el registro de los costos, los alcances, los impactos y los recursos específicos de las acciones de adaptación lo que dificulta estimar la inversión económica del país en el tema, además del retorno de la inversión y cómo esto contribuye al cumplimiento de las metas nacionales en cambio climático [19].

Consciente de la importancia de la salud de los ecosistemas como uno de los recursos más eficientes para enfrentar el cambio climático, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) incluyó en su Programa Global 2017-2020 las SbN como una de sus tres áreas programáticas [20] y como base de las cinco áreas programáticas en el Programa Global 2021-2024 [21].

En este marco, la Oficina Regional para México, América Central y el Caribe (ORMACC) de la UICN analizó alrededor de 130 proyectos de cambio climático en Guatemala, Honduras, El Salvador, Panamá y Costa Rica con el objetivo de contribuir a visualizar las prioridades de los países en este tema. Esto resulta especialmente importante si se considera que Mesoamérica, es una de las áreas de mayor biodiversidad del mundo y una de las prioritarias para la implementación de SbN [22], pero seis de estos países están entre las primeras cuarenta posiciones mundiales de exposición a riesgo climático [23].

El análisis se llevó a cabo como parte del proyecto "Transformando la evidencia en cambio: un enfoque holístico para la Gobernanza de la Adaptación Basada en Ecosistemas" implementado por ORMACC de 2014 a 2018 y financiado por el Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear de Alemania.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos solamente para Costa Rica. Se analizaron 43 proyectos de cambio climático considerando 4 ejes temáticos consecuentes con los 7 desafíos sociales del Criterio 1 del Estándar Global de SbN de UICN [10]. Estos son: mejora de la seguridad alimentaria; disponibilidad y gestión del recurso hídrico; protección y recuperación de ecosistemas y; fortalecimiento de capacidades locales.

La seguridad alimentaria se entiende como la situación en la que: "todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a suficientes alimentos inocuos y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias en cuanto a los alimentos a fin de llevar una vida activa y sana" [24]. La protección y gestión del recurso hídrico, se vincula con el concepto de seguridad hídrica, que es: "el nivel de riesgos relacionados con el agua aceptable para los humanos y los ecosistemas, unido con la disponibilidad de agua en calidad y cantidad suficiente para apoyar medios de vida, seguridad nacional, salud humana y servicios ecosistémicos" [25]. La protección y recuperación de ecosistemas incluye la conservación de la biodiversidad y de los recursos naturales por su papel clave en la provisión de bienes y servicios ecosistémicos. En las capacidades locales, se integra el fortalecimiento de habilidades y conocimiento para mejorar la participación, el acceso a la información, la toma de decisiones, y la comprensión sobre el cambio climático.

Se espera que los resultados de este análisis provean información útil para el diseño y priorización selección de futuros proyectos de cambio climático con el fin de orientar y mejorar las inversiones y la proyección de sus impactos en la reducción de las vulnerabilidades climáticas no solo en Costa Rica, sino también a nivel regional.

Materiales y métodos

La metodología utilizó un enfoque mixto con recopilación de información cualitativa y cuantitativa entre marzo del 2016 y septiembre del 2017. Los objetos del estudio fueron 43 proyectos sobre SbN al cambio climático en Costa Rica, y los datos se analizaron atendiendo a los 4 ejes temáticos que se mencionaron anteriormente.

No se realizó un muestreo aleatorio, sino que se delimitó el universo de análisis seleccionando los proyectos que cumplieron con las siguientes características: a) fueron implementados en cualquier área del territorio costarricense, con o sin participación de otros países; b) tienen como meta atender aspectos relacionados con el cambio climático; c) el período de ejecución

de actividades fue igual o mayor a 12 meses; d) su fecha de cierre no fue más de 12 meses en el momento de la recopilación de la información. Esta investigación no incluye en forma exhaustiva todos los proyectos sobre cambio climático en el país, sino solamente aquellos que cumplen con los criterios a), b) y c). A estos se les sumó el d) solamente en el caso de los ya concluidos.

La información se recopiló usando fuentes primarias, es decir, mediante la aplicación de entrevistas semiestructuradas dirigidas a representantes de organizaciones e instituciones, gestores, coordinadores de los proyectos y expertos en cambio climático. Además, se analizó información secundaria como documentos, publicaciones y otros.

Esta información fue sistematizada y procesada en una base de datos en formato Excel con las siguientes variables cualitativas: a) palabras clave en el título oficial; b) palabras clave en los objetivos generales; c) países de implementación; d) ejecutor principal y tipología; e) socios implementadores y tipología; f) escala de implementación de las actividades; g) actividades realizadas clasificadas por eje temático; h) subactividades; i) impactos esperados directos e indirectos de cada actividad; y, j) ámbito geográfico de implementación.

Las variables cuantitativas fueron: a) período de ejecución; b) presupuesto total en dólares de Estados Unidos de América (USD).

El análisis de la información fue de carácter descriptivo, es decir, no se evaluaron ni valoraron los resultados ni los impactos de la implementación de los proyectos.

Los datos se alojaron en el Sistema de Información Ambiental de UICN-ORMACC², una plataforma digital para el almacenamiento y visualización cartográfica. En esta plataforma se incluyó la información georreferenciada de cada iniciativa. Se elaboraron mapas que son accesibles en el servidor web de Mapas ARGIS de la UICN.

Resultados

Período de ejecución

El rango de implementación de los 43 proyectos analizados fue de 2012 a 2022. Las de ámbito nacional suelen implementarse mayormente de 1 a 3 años, mientras que las de ámbito regional de 2 a más de 4 años.

Ámbitos geográficos

El 72% de los proyectos se implementaron exclusivamente en el ámbito nacional y el 28% fueron regionales, es decir implementado en Costa Rica y otros países de Mesoamérica o del Caribe.

El 92% de los proyectos regionales que tuvieron actividades en Costa Rica, también las tuvieron en Guatemala y Honduras, países con los que coincide mayormente cuando se trata de acciones en cambio climático. En el 83% coincidió con actividades implementadas también en El Salvador; en el 75% en Nicaragua; 66% en Panamá; 33% en República Dominicana, y 25% en Chiapas-México. Belice es el país con el que Costa Rica menos compartió acciones en este tema, solamente un 17%.

El 84% de los proyectos con acciones en Costa Rica tuvieron incidencia a nivel local, específicamente en 76 comunidades, siendo aquellos que se encuentran en los cantones de Hojancha, Nandayure, Sarapiquí y León Cortés los de mayor incidencia. Además, se identificó una concentración de proyectos en las provincias costeras de Guanacaste, Limón y Puntarenas (figura 1).

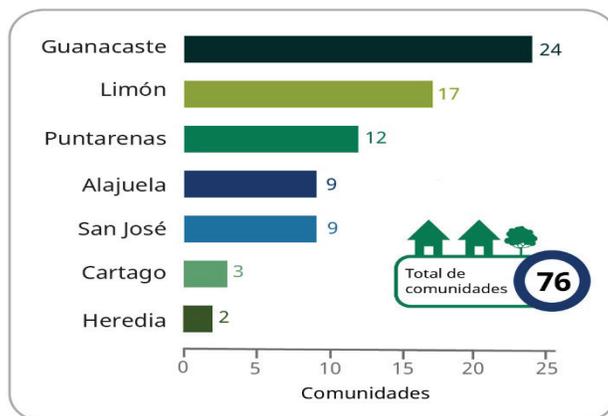


Figura 1. Cantidad de comunidades donde se implementaron los proyectos sobre cambio climático.

Ejes temáticos

Considerando los efectos directos en los 4 ejes temáticos, se analizaron los proyectos bajo tres aproximaciones: desde la formal (títulos y objetivos); desde la planificación (actividades y ejes temáticos de influencia); y desde la proyección (los efectos esperados de las actividades como resultado de la ejecución en el terreno).

1. **Aproximación formal:** Existe similitud entre las palabras más mencionadas en el título y en los objetivos generales, siendo predominantes las que se relacionan con "cambio climático", "adaptación", "recurso hídrico" y "vulnerabilidad". Sin embargo, "seguridad alimentaria" y conceptos asociados, aparecen poco, y "restauración" no aparece en ninguno de los casos (figura 2).

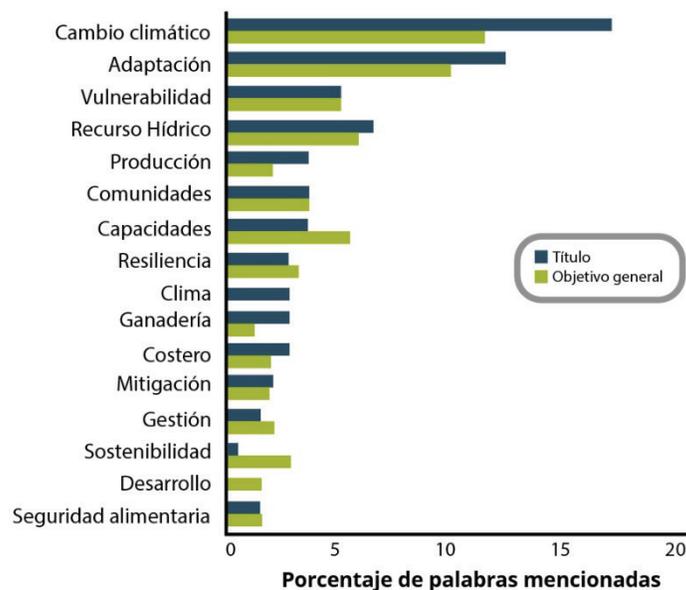


Figura 2. Porcentaje de palabras mencionadas en el título y objetivo general de los proyectos analizados.

2. **Planificación:** Las actividades se orientaron principalmente al fortalecimiento de capacidades priorizando en temas de adaptación, manejo del recurso hídrico, cambio climático y riesgo, pero menos en monitoreo, gobernanza y seguridad alimentaria. En segundo lugar, se priorizó la protección y recuperación de ecosistemas (que incluye el manejo de ecosistemas y nacientes de agua, y los menos priorizados fueron la atención de áreas degradadas y el monitoreo de especies). En tercer lugar, a la protección del recurso hídrico (enfocado en nacientes de agua, cuencas hidrográficas y contaminación, pero no mencionó el uso eficiente del agua). En cuarto lugar, a la seguridad alimentaria, que se enfocó en la diversificación y producción orgánica y agroforestal; los mercados justos no fueron prioridad (figura 3).

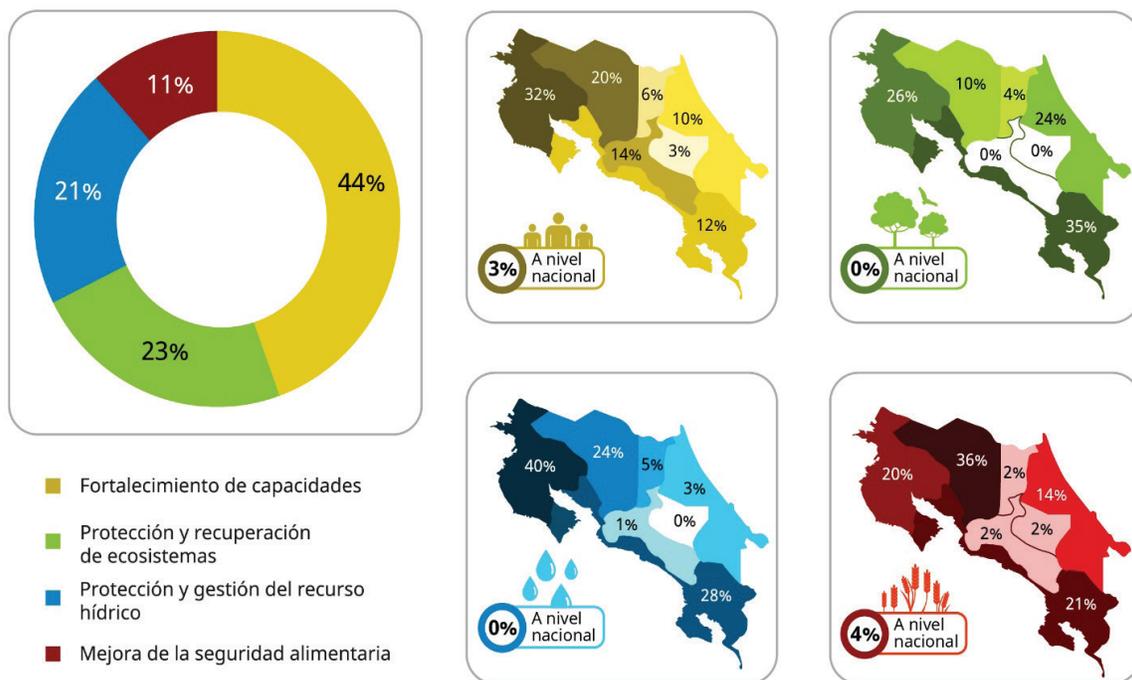


Figura 3. Temas que priorizan las actividades de los proyectos sobre el cambio climático e incidencia geográfica por provincia.

3. **Proyección:** Los efectos directos esperados estuvieron dirigidos a mejorar las capacidades para toma de decisiones (42%) y la disponibilidad del recurso hídrico (23%). Mejorar la seguridad alimentaria ocupó el cuarto puesto con el 11%. La mejora de las condiciones ambientales ocupó el último puesto como efecto directo, pero el primero como efecto indirecto.

Ejecutores y ámbito de actuación

Las ONG (de ámbito nacional o regional) tuvieron la responsabilidad principal en la cuarta parte de los proyectos y se aliaron en la mitad de estos casos con las entidades de gobierno como socios implementadores. Las asociaciones comunitarias tuvieron muy poca presencia como líderes de los proyectos (solo el 4,3%).

Llama la atención que, en las actividades para el fortalecimiento de capacidades, las asociaciones comunitarias no estuvieron presentes como ejecutores, aunque posiblemente fueron beneficiarios; estas actividades fueron lideradas por el sector privado (31%), las instituciones de gobierno y las ONG (22% respectivamente). Estos dos últimos también lideraron el 77% los proyectos de protección de ecosistemas. Casi la mitad de los proyectos de protección del recurso hídrico fueron llevados a cabo por el sector privado, luego siguen las asociaciones comunitarias (23%) y las ONG (18%). Finalmente, la seguridad alimentaria fue abordada por las asociaciones comunitarias casi en la misma medida que las ONG e instituciones de gobierno (aproximadamente 30% cada una).

Tomando en cuenta la distribución geográfica, los proyectos que fueron lideradas por las asociaciones comunitarias, el sector privado y el sector académico se concentraron en la provincia de Guanacaste. En la provincia de Alajuela, los de las instituciones de gobierno y organismos internacionales. Las ONG se enfocaron más en la provincia de Limón. Las ejecutados por el sector académico, cooperativas y las entidades donantes predominaron en la provincia de San José. La provincia de Puntarenas fue prioritaria también para asociaciones comunitarias, y prácticamente la mitad de los proyectos que se dieron en la provincia de Cartago fueron liderados por el sector académico. En Heredia no se visualizó una tendencia clara, aunque fueron las ONG las que tuvieron mayor presencia.

Presupuesto total

El presupuesto total de 33 de los proyectos (debido a que no se logró recopilar información de todos) fue alrededor de 24.023.065 USD, mismo que fue distribuido de la siguiente manera: un 26% para implementar actividades en la provincia de Guanacaste, el 23% en Alajuela, el 16% en Limón, el 14% en San José y el 9% en Puntarenas. Cartago y Heredia fueron las provincias con menos inversión, con un 6% cada uno.

Los Organismos Internacionales son los que gestionan la mayoría de los presupuestos de los proyectos de cambio climático (43%). Muy por debajo se encuentran las entidades de gobierno con el 15%, el sector privado con el 13%, y las ONG con el 10%. El 6% los gestionan directamente los donantes; el 5% el sector académico y las asociaciones comunitarias con el 5% del total de los presupuestos. Las cooperativas son las que menos gestionan presupuesto (2%).

Conclusiones y recomendaciones

En los proyectos de cambio climático en Costa Rica, la adaptación está presente en diversas formas, tanto como actividades de protección, de restauración, como en el aumento de las capacidades para hacer frente con más eficiencia a sus efectos.

El término "adaptación al cambio climático" en sí, es utilizado con relativa frecuencia ya que aglutina de alguna forma, las acciones que ya desde mucho tiempo se viene implementado para enfrentar el cambio climático. Este es aún un concepto en desarrollo [2] pero es ampliamente utilizando bajo otras terminologías [26]. Si bien la consolidación de estas acciones bajo la palabra "adaptación" ha facilitado una mayor apropiación de este enfoque a nivel político y en cuanto a los mecanismos financieros, desde la perspectiva más social, esto no dista mucho de lo que ya se ha venido haciendo para las disminuir vulnerabilidades climáticas. Es por ello por lo que, los proyectos que no mencionan la palabra "adaptación" en su título u objetivos, no necesariamente implica que en la práctica no se esté aplicando este enfoque.

En Costa Rica, el fortalecimiento de capacidades es el tema principal en la implementación de proyectos sobre cambio climático. Esto es sumamente importante, puesto que la sostenibilidad depende en primero lugar, de la generación de capital social definido como: el conjunto de recursos disponibles con que el individuo cuenta a raíz de su participación en redes sociales [27]. Lo anterior a través de la construcción de capacidades colectivas para aprovechar mejor los recursos científicos, económicos o tecnológicos.

Los proyectos sobre fortalecimiento de capacidades en cambio climático que se analizaron priorizan temas de adaptación, el manejo de los recursos hídricos, la atención de riesgos climáticos y el monitoreo como subtemas (la mayoría considerados capacidades duras), pero temas vinculados las capacidades blandas [28] como la gobernanza climática, la participación, la seguridad alimentaria o el intercambio de experiencias, no forman parte de las prioridades inmediatas. Los resultados están en concordancia con otros estudios [29] que muestran que, el fortalecimiento de capacidades en cambio climático parece estar siendo enfocado en problemas técnicos y no en aspectos sociales, que son esenciales en la relación entre sociedad y medio ambiente.

Es clave entonces destinar más esfuerzos a la misma sostenibilidad social de los procesos, especialmente en aquellas áreas más vulnerables, ya que, según el IPCC, la consecución de resultados positivos para enfrentar el desafío climático depende la implantación de sistemas de gobernanza a nivel local [30].

Lo anterior puede estar relacionado con el hecho de que, si bien las asociaciones comunitarias son beneficiarias de estos proyectos, no los lideran. Esto afecta el empoderamiento sobre las SbN, la cooperación y la distribución más equitativa de los beneficios que estas generan.

Mejorar la salud de los ecosistemas es el segundo tema prioritario en la planificación de los proyectos sobre cambio climático en el país. Sus beneficios se perciben principalmente como indirectos y se alcanzan a través de la protección y recuperación de los ecosistemas y el manejo de los recursos naturales. Actividades para la recuperación de áreas degradadas, el monitoreo de especies o la protección de zonas vulnerables como acciones para asegurar también la salud de los ecosistemas, no fueron suficientemente integradas.

Relacionado con lo anterior, es importante destacar que el nivel más alto de recuperación forestal en el país se dio entre el año 2006 y el 2014 y se registró principalmente en Guanacaste, la Zona Norte, el Caribe y en el Pacífico Sur. Posteriormente del 2014 al 2019 (dentro del período de esta investigación), el país tuvo aumento en la tasa de cambio de uso de la cobertura forestal en el país hacia pastos, cultivos y usos urbanos, lo que evidencia la existencia de nuevas presiones [23]. Si bien, la recuperación de áreas degradadas puede estar siendo abordado en el país desde otros mecanismos, como procesos de rehabilitación de paisajes degradados [31] o el aumento de las áreas protegidas, desde el diseño e implementación de proyectos sobre cambio climático, parece que no es una prioridad.

Al respecto, el Programa de Pago de Servicios Ambientales impulsado en la Estrategia Nacional REDD+ [32] ha sido clave para contener y revertir esta tendencia, lograr un mayor empoderamiento social sobre la recuperación de bosque y una mejor distribución de beneficios económicos derivados de esto. Integrar este mecanismo como parte de los objetivos de futuros proyectos de cambio climático es una de las recomendaciones de esta investigación.

A nivel nacional, el recurso hídrico se identificó como penúltima prioridad como eje central de los proyectos, esto a pesar de que el agua puede impulsar procesos más amplios de adaptación al cambio climático y que está estrechamente vinculada con la estabilidad ecológica y la productividad del país. Sin embargo, sí fue un tema muy presente en el diseño, en la

planificación, en su ejecución a través de las actividades de restauración de ecosistemas. Estos proyectos fueron implementados mayormente en las provincias costeras del país, consideradas entre las de mayor concentración de fenómenos atmosféricos generadores de impactos [33].

Solo el 1% de los proyectos sobre recurso hídrico se enfocaron la distribución y el uso eficiente del agua como subtema. El acceso al agua es un factor altamente relacionado con los conflictos sociales, el bienestar y los índices de pobreza. Por ejemplo, en Costa Rica, para el año 2017, el agua fue la segunda temática generadora de conflictos y movilizaciones, muchas relacionadas con la distribución y uso adecuado de este recurso [34]. Entre 1998 y 2018 la Sala Constitucional atendió cerca de 8.000 recursos por asuntos de orden ambiental, de los cuales el 21,2% fueron declarados con lugar. Los asuntos relacionados con agua, basura y contaminación concentraron el 83% [18].

El agua sigue siendo uno de los factores determinantes para la sostenibilidad de cualquier país y más aún en el contexto de cambio climático. En Costa Rica entre 2018 y 2020, este recurso fue uno de los indicadores analizados en la evaluación de índice de desempeño ambiental (elaborado por las Universidades de Yale y Columbia) y uno de los tres peor evaluados: el recurso hídrico (9,7), la pesquería (10,8) y la agricultura (19,4). Esto produjo que el país sufriera una caída de 22 lugares en cuanto a su desempeño ambiental [19].

Es clave destinar más esfuerzos e inversiones a este tema a través de los proyectos no solo por su vinculación con el cambio climático, sino por la relación estrecha que tiene con los conflictos sociales por uso intensivo o contaminación y el aumento de los riesgos climáticos.

La seguridad alimentaria, si bien es particularmente importante para reducir los efectos negativos del cambio climático sobre el bienestar humano, no fue priorizado de forma directa en los proyectos analizados. Estos no se diseñan pensando en seguridad alimentaria como un eje clave en la lucha contra el cambio climático, y, ocupa una posición marginal en relación con los efectos esperados.

En los casos en que la seguridad alimentaria es incorporada, la tendencia es enfocar las actividades en la producción de alimentos (por ejemplo, diversificación, producción orgánica y sistemas agroforestales), pero subtemas vinculados a la distribución de esos alimentos (como mercados, intercambios, comercio justo, acceso) están prácticamente ausentes lo que pone en riesgo la sostenibilidad de la misma producción. De forma global, los proyectos analizados no abordan de forma suficiente los cuatro pilares de la seguridad alimentaria: la disponibilidad, el acceso, el uso y la estabilidad [35], como medidas para enfrentar el cambio climático.

Se debe prestar atención a la interrelación entre la seguridad alimentaria en las vulnerabilidades al cambio climático y en la eficiencia de las demás áreas temáticas analizadas. Los sistemas alimentarios se ven afectados por fenómenos climáticos, pero también los propios sistemas alimentarios repercuten en el estado del medio ambiente.

Por ejemplo, en Guanacaste, el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, documentó para el 2019, condiciones críticas durante la estación seca, las sequías y un fuerte impacto del efecto del cambio climático [36]. Esta situación no solo se debe al cambio climático, sino también al uso inadecuado del recurso hídrico, situación que profundiza los problemas de seguridad alimentaria y reduce las condiciones propicias para lograr un óptimo desarrollo humano.

Un tema clave sobre los efectos negativos que el cambio climático puede producir, es el riesgo a desastres en la naturaleza y en los sistemas humanos. A pesar de que este es uno de los efectos del cambio climático que el ser humano percibe de forma inmediata, solo 3 de los 43 proyectos analizados mencionaron el riesgo climático en sus objetivos y este tema formó parte solo del 5% del total de actividades. Se recomienda integrar la gestión del riesgo más allá del

área de intervención directa como uno de los ejes temáticos de futuros análisis sobre proyectos de cambio climático, recomendación que es consecuente con lo planteado en el criterio 2 del Estándar Global de SbN de UICN [10]. Sobre esto, el Sistema de Información Ambiental de UICN-ORMACC³, brinda una oportunidad importante para comparar los datos obtenidos con áreas vulnerables a riesgos o susceptibles a restauración.

Sobre la sostenibilidad de los resultados, las acciones sobre cambio climático analizadas suelen considerar procesos que requieren un período de ejecución y seguimiento a largo plazo (como la mejora de medios de vida, la recuperación de ecosistemas, entre otros). Solo el 3,2% de los proyectos se ejecutan por 4 años o más, lo que puede estar limitando el alcance y la permanencia de los resultados. Estos resultados concuerdan por los hallazgos de la investigación de Valerio H. sobre estrategias de cambio climático en Costa Rica [16] donde menciona: "el proceso de planeación y programación de acciones se enfocó en la elaboración de perfiles de proyectos climáticos y no en un plan de acción climática de largo plazo, sino en la formulación de iniciativas de mediano y corto plazo, basadas". Se recomienda fomentar iniciativas nacionales de más largo plazo.

Se destaca la amplia participación de las ONG y el sector privado en prácticamente todos los temas. Lo anterior es una oportunidad importante para potenciar una mejor orientación en las inversiones y aumentar la resiliencia climática de las comunidades y de los ecosistemas.

Tomando en cuenta todos los proyectos y sus presupuestos, las ONG y el sector académico, lideran la mayor cantidad de ellos, pero de menos presupuestos. En cambio, los organismos internacionales se concentran en menos proyectos de mayor presupuesto. Esto se puede estar dando porque los liderados por los organismos internacionales son mayormente regionales y se ejecutan por más años y, además, porque los costos asociados en personal, administración y logística son mucho mayores.

Los desafíos a que nos enfrenta el cambio climático deben ser abordados por todos los sectores, especialmente aquellos de incidencia directa en las áreas más vulnerables. Los grupos comunitarios y entidades de gobierno, suelen ser beneficiarios en muchos proyectos de cambio climático Costa Rica, pero los primeros no tienen un papel definido en el liderazgo ni en la ejecución presupuestaria, aunque sí, son importantes aliados. Es clave insistir en la importancia del fortalecimiento de capacidades en temas de participación y gobernanza, para facilitar el empoderamiento de las comunidades en la lucha contra el cambio climático.

Las soluciones al cambio climático exigen mayores asociaciones y financiación a gran escala durante varios años que pueden incluir programas integrados de reducción y gestión de los riesgos de desastres, políticas de adaptación al cambio climático, y prácticas a corto, medio y largo plazo destinadas a mitigar la repercusión de la variabilidad y las condiciones extremas del clima, en particular la pobreza y la desigualdad persistentes [37].

Lo anterior es particularmente clave tomando en cuenta que los posibles efectos de la pandemia COVID 19 sobre la estabilidad de los sistemas humanos y naturales, y sobre la disponibilidad presupuestaria para proyectos de cambio climático.

Como lo menciona el informe de Estado de la Región para el año 2021 [23], la dependencia de la cooperación internacional determina la agenda y el alcance del quehacer de la institucionalidad regional. La gestión vía proyectos de cooperación limita la sostenibilidad de

las acciones y el fortalecimiento de las capacidades de las instituciones, dado que impide sustentar plataformas técnicas y organizativas en el largo plazo, y muchas veces se priorizan las agendas internacionales de desarrollo antes que las regionales o nacionales.

La vulnerabilidad ambiental, social o económica debido al cambio climático en Costa Rica, hace especialmente urgente la necesidad de impulsar acciones que permitan no solo reducirla, sino también potenciar beneficios más a largo plazo. El diseño de acciones sobre cambio climático debe considerar además de las necesidades locales, la sostenibilidad de sus resultados en beneficio de los grupos y ecosistemas climáticamente más vulnerables. Esta sostenibilidad además debe considerar la integración de temas como recurso hídrico, seguridad alimentaria, capacidades y restauración de ecosistemas de forma integral y atendiendo a las necesidades nacionales.

En este sentido, las SbN son medidas viables que implican menores riesgos ambientales, son más accesibles, sostenibles y generadores de innumerables beneficios, pero su sostenibilidad depende de una apuesta fuerte por mejorar las capacidades, de una mayor socialización de resultados y mejor distribución de beneficios.

Agradecimientos

Se agradece profundamente a UICN-ORMACC, a la Dirección General de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente y Energía de Costa Rica; al Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear de Alemania; a la Fundación Vida de Honduras; a la Unidad Ecológica Salvadoreña; a la Asociación Corredor Biológico Talamanca Caribe en Costa Rica; y al personal de los proyectos analizados.

Referencias

- [1] IPCC, "Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, (editores). Cambridge, Inglaterra, Tech. Report. 2007.
- [2] G.O. Magrín, "Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe". Documento de proyecto. Euroclima, CEPAL, Unión Europea. Santiago, Chile, 2015.
- [3] J.L. Samaniego et al., "Panorama de las contribuciones determinadas a nivel nacional en América Latina y el Caribe: avances para el cumplimiento del Acuerdo de París," Santiago, Chile 2019.
- [4] Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Cambio Climático, "Contribución Nacionalmente Determinada". San José, Costa Rica, Tech. Report. 2020.
- [5] Ministerio de Ambiente y Energía, Dirección de Cambio Climático, Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Planificación y SEPLASA. "Política nacional de adaptación al cambio climático de Costa Rica 2018-2030", San José, Costa Rica, 2018.
- [6] Gobierno de Costa Rica, "Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050". San José, Costa Rica, 2019.
- [7] IPBES, "Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services". E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz y H. T. Ngo (editores). Bonn, Alemania, Tech. Report. 2019.
- [8] F. Rubio F. "Ecosystem-based adaptation to climate change: concept, scalability and a role for conservation science". *Perspectives in Ecology and Conservation*, vol. 15, pp. 65-73, 2017.
- [9] Andrade, A., et al., Principios y lineamientos para la integración del enfoque basado en ecosistemas en el diseño de proyectos y políticas de adaptación: un documento para discusión. Síntesis para decisores. 2011.
- [10] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, "Estándar Global de la UICN para soluciones basadas en la naturaleza: un marco sencillo para la verificación, el diseño y la extensión de SbN," Gland, Suiza, 2020.
- [11] Arauz Cristina y Mariano Marzo, "Las soluciones basadas en la naturaleza como herramienta para mitigar el cambio climático". *Revista Ambienta*, no. 127, Marzo, pp. 24-31, 2021.

- [12] B. Griscoma et al., "Natural climate solutions". *Revista Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol 114, pp.11645–11650, 2017.
- [13] Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, "Perspectiva Mundial sobre la Diversidad Biológica 5: resumen para los responsables de formular políticas," Montreal, Canadá, Tech. Report. 2020.
- [14] The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, "Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services," E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz y H. T. Ngo (editores). Bonn, Alemania, Tech. Report. 2019.
- [15] Ministerio de Ambiente y Energía *et al.*, "Resumen del Sexto Informe Nacional de Costa Rica ante el Convenio de Diversidad Biológica," San José, Costa Rica, Tech. Report. 2018.
- [16] Valerio H., "Estrategias locales de lucha contra el cambio climático con enfoque participativo: estudio de casos de la experiencia en Costa Rica 2011-2018", Tesis doctoral. Costa Rica. 2020.
- [17] L. Merino Trejos, "Balance de Armonía con la Naturaleza 2019". PEN, San José, Costa Rica, Tech. Report. 2019.
- [18] Programa Estado de la Nación, "Informe Estado de la Nación 2021," San José, Costa Rica, Tech. Report. 2021.
- [19] Programa Estado de la Nación, "Informe Estado de la Nación 2020. Capítulo 10, en Armonía con la naturaleza," San José, Costa Rica. Tech. Report. 2020.
- [20] UICN, "Programa de la UICN 2017- 2020," Gland, Suiza. 2016.
- [21] UICN, "World Conservation Congress-2016-Resolución-069-SP," Gland, Suiza, Tech. Report. 2016.
- [22] De Lamo, *et al.*, "Stenhgthening synergies: how action to achieve post-2020 global biodiversity conservation targets can contribute to mitigatin climate change". Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Centro Mundial para el Monitoreo de la Conservación. 2020.
- [23] Programa Estado de la Nación, "Informe del Estado de la Región 2021," 2021. San José, Costa Rica.
- [24] Comité de Seguridad Alimentaria Mundial, "39º período de sesiones," Roma, Italia, Tech. Report. 2012.
- [25] M. Zeitoun, "The Global Web of National Water Security: The Global Web of National Water Security". *Global Policy*, vol. 2 (3), pp. 286-296, 2011.
- [26] M.R. Shaw M.R., J.T. Overp, eck, y G.F. Midgley, "Cross-chapter box on ecosystem based approaches to adaptation emerging opportunities". *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014.
- [27] J. Coleman, *Foundation of Social Theory*. Londres, Inglaterra: Universidad de Harvard Press, 1990.
- [28] Ortiz, A., y Taylor, P., "Learning purposefully in Capacity Development. Why, What and When to Measure? International Institute for Educational Planning" IIEP-UNESCO. 2009.
- [29] Abellán M.A., "Capital social, redes de confianza y cambio climático: un enfoque neoinstitucionalista-tecnocrático". *MIRÍADA*, Año 13, no. 17, pp. 251-269, 2021.
- [30] Intergovernmental Panel on Climate Change. "El cambio climático y la Tierra," Tech. Report. 2019.
- [31] Canel G., ¿ Primer informe nacional de rehabilitación de paisajes degradados en Costa Rica," Cosfa Rica, 2018.
- [32] Ministerio de Ambiente y Energía, "Estrategia Nacional REDD+ Costa Rica". San José, Costa Rica. 2017.
- [33] Ministerio de Ambiente y Energía, "Cuarta comunicación nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", Costa Rica, 2021.
- [34] Programa Estado de la Nación, "Estado de la Nación," San José, Costa Rica, Sci. Rep. 2017.
- [35] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), "Información para la toma de decisiones: guía práctica", 2011.
- [36] Universidad de Costa Rica, "Guanacaste en la encrucijada frente al clima". *Ciencia más Tecnología*. 2019. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/07/10/guanacaste-en-la-encrucijada-frente-al-clima.html>
- [37] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura *et al.*, "El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2021; transformación de los sistemas alimentarios en aras de la seguridad alimentaria, una nutrición mejorada y dietas asequibles y saludables para todos". Roma, Italia, 2021.

Optimización del punto de operación de un impulsor axial sin eje central en flujo sanguíneo

Optimization of the operating point of an axial impeller without central shaft in blood flow

Johanna Muñoz-Pérez¹

Fecha de recepción: 17 de julio de 2021

Fecha de aprobación: 29 de octubre de 2021

Muñoz-Pérez, J. Optimización del punto de operación de un impulsor axial sin eje central en flujo sanguíneo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 48-59.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5625>

¹ Maestría en Ingeniería en Dispositivos Médicos, Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jmunoz@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1778-414X>

Palabras clave

Diseño de experimentos; gráfica superpuesta de contorno; gráfica de interacción; impulsor axial; optimización de respuesta.

Resumen

Este artículo abarca la obtención de los modelos matemáticos para las respuestas de deformación volumétrica, diferencia de presión y caudal de un impulsor axial diseñado para un dispositivo de asistencia ventricular. Dicho impulsor posee una geometría novedosa que requiere la validación de su comportamiento a nivel estructural y de dinámica de fluidos. Basándose en las especificaciones requeridas para la aplicación se obtiene el punto de operación óptimo del impulsor en cuanto a su velocidad de rotación, material y velocidad de salida del flujo sanguíneo. Asimismo, se obtiene el rango de valores de los factores que cumplen con las especificaciones. Dentro de los materiales incluidos se tiene el Platino y el polímero biocompatible Peek. El análisis se realiza por medio de un diseño de experimentos factorial completo, con resultados obtenidos previamente utilizando herramientas de simulación. La obtención de los modelos matemáticos se realiza por medio de la depuración de los factores de entrada y sus interacciones.

Keywords

Design of experiments; superimposed contour plot; interaction plot; axial impeller; response optimization.

Abstract

This article covers the obtention of the mathematical models for the volumetric strain, pressure difference, and flow responses of an axial impeller designed for a ventricular assist device. This impeller has a novel geometry that requires the validation of its behavior at the structural and fluid dynamics level. Based on the specifications required for the application, the optimal operating point of the impeller is obtained in terms of its rotational velocity, material, and blood flow output velocity. Likewise, the range of values of the factors that meet the specifications is obtained. Among the materials included are Platinum and the biocompatible polymer Peek. The analysis is carried out by means of a full factorial design of experiments, with results previously obtained using simulation tools. Obtaining the mathematical models is carried out by debugging the input factors and their interactions.

Introducción

En Costa Rica, el 29% de las enfermedades mortales están relacionadas con padecimientos cardíacos [1]. Los dispositivos de asistencia ventricular se utilizan usualmente como un tratamiento temporal de uno de dichos padecimientos: la insuficiencia cardíaca [2, 3]. En esta condición, el corazón pierde su capacidad para funcionar como una bomba de sangre y proveer el gasto cardíaco requerido, es decir, la cantidad de sangre que demanda el cuerpo por minuto [4, 5].

Dentro del Área Académica de Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica se realiza el diseño de un dispositivo de asistencia ventricular con una nueva geometría en su impulsor y material de fabricación. Dicha modificación plantea la utilización de un impulsor

sin eje central con el objetivo de estudiar su comportamiento frente al modelo comercial de impulsor con eje central. Además, se pretende utilizar un polímero biocompatible para fabricar el conjunto, lo que facilitaría la producción y abarataría los costos del producto.

En este desarrollo es requerido establecer si el nuevo diseño de impulsor logra cumplir con los requerimientos de funcionamiento a nivel de fluidos, supliendo un caudal de sangre de al menos 4 L/min y una diferencia de presión entre la entrada y salida del impulsor de al menos 40 mmHg [6]. De igual forma, la utilización de un nuevo material requiere comprobar que se mantiene su integridad estructural al someterse a las presiones que ejerce el fluido sobre las paredes del impulsor, así como a la presión característica del ciclo cardiaco [7, 8].

Actualmente, la utilización de herramientas computacionales para el estudio de fenómenos físicos permite un primer abordaje a las inquietudes planteadas. Estos paquetes de software discretizan la estructura por estudiar y resuelven las ecuaciones apropiadas según la física de estudio [9]. Los resultados de este artículo se obtienen utilizando el software COMSOL® para los parámetros de respuesta: deformación volumétrica, diferencia de presión y caudal del impulsor axial sin eje central para los materiales de Platino y el polímero biocompatible Teca Peek [10, 11].

Por medio de un diseño de experimentos factorial utilizando la herramienta Minitab® se determinan los factores y las interacciones entre los mismos que establecen cada parámetro de respuesta, para de esta forma obtener las ecuaciones de regresión correspondientes. Finalmente, se optimizan las respuestas para cumplir con los criterios de funcionamiento del impulsor axial sin eje central y analizar su factibilidad de uso en un dispositivo de asistencia ventricular [12, 13].

Metodología

La investigación desarrollada se clasifica como cuantitativa, con alcance exploratorio, de diseño no experimental y de tipo transversal [14]. El planteamiento del diseño de experimentos inicia por la descripción de las variables involucradas. Al requerir obtener las salidas de deformación volumétrica, diferencia de presión y caudal se desprende que las entradas corresponden a la velocidad de rotación del impulsor, la velocidad de salida del flujo sanguíneo y el tipo de material. En los cuadros 1 y 2 se detalla la definición de las entradas y salidas del diseño de experimentos, basado en el desarrollo en [6].

Cuadro 1. Descripción de los parámetros de salida del diseño de experimentos.

Respuesta	Símbolo	Especificación
Deformación volumétrica (% o adimensional)	ϵ_v	0.6 % o inferior
Diferencia de presión (mmHg)	ΔP	40 – 60
Caudal (L/min)	Q	4 - 5,5

Cuadro 2. Descripción de los parámetros de entrada del diseño de experimentos.

Nombre	Factor	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto	Efecto esperado
Velocidad de rotación del impulsor (rpm)	A	7 500	9 000	10 500	A mayor velocidad de rotación aumenta la deformación volumétrica y la diferencia de presión
Velocidad de salida del flujo sanguíneo (m/s)	B	0,25	0,625	1,00	A mayor velocidad de salida aumenta la deformación volumétrica y el caudal, pero disminuye la diferencia de presión
Material	C	Peek	No aplica	Platino	La deformación volumétrica del Platino debe ser menor a la del Peek

Una vez establecidas las variables se describe el proceso para su obtención. En esta etapa de la investigación se aprovechan las ventajas de la simulación mediante el método de elementos finitos. Si bien es cierto que los modelos computacionales se asemejan, pero no son iguales a los modelos físicos, es precisamente esta característica la que permite obtener información reduciendo los tiempos de cómputo. Dentro del software COMSOL® se trabaja con las físicas de mecánica estructural y mecánica de fluidos realizando su integración como se muestra en la figura 1 [15, 16].

Básicamente, se inicia con una simulación de mecánica de fluidos en donde aún no se ha definido un material para la estructura, debido a que el resultado deseado corresponde a perfiles de velocidad, vorticidad entre otros y al campo de presiones que ejerce el fluido sobre la estructura. Este campo de presiones se utiliza como condición de frontera en una simulación de mecánica estructural donde se contempla el material del conjunto de impulsión. De esta forma, el resultado de la simulación corresponde a la geometría deformada por las presiones ejercidas sobre la estructura. La geometría deformada se importa a una nueva simulación de mecánica de fluidos para estudiar el efecto a nivel del comportamiento del fluido que causó la deformación.

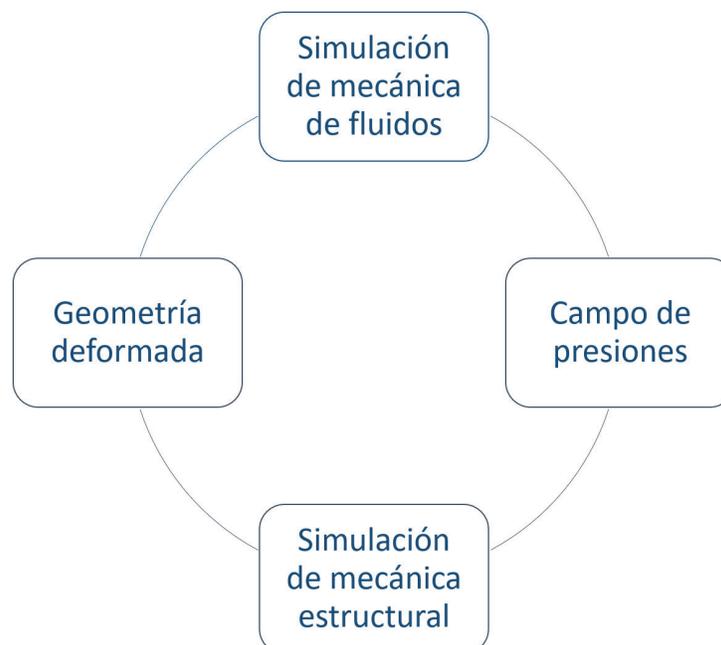


Figura 1. Integración de la mecánica estructural y la mecánica de fluidos.

Por último, se realiza la descripción del diseño de experimentos. Debido a que se cuenta con tres factores y dos niveles por cada factor se plantea un diseño de experimentos factorial completo 2^3 lo que equivale a ocho experimentos para una repetición completa de las combinaciones de los factores. Sin embargo, con el fin de aumentar los grados de libertad requeridos para calcular el cuadrado medio del error se añaden dos puntos centrales, uno por cada nivel del factor categórico del material. De esta forma se realizan un total de 10 experimentos [17].

Análisis de resultados

En la creación del diseño factorial completo 2^3 se define un bloque, una repetición y dos puntos centrales para obtener la matriz del experimento del cuadro 3 que se presenta según el orden estándar de las corridas. Seguidamente, se realiza un primer análisis de las respuestas utilizando un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ para identificar los factores e interacciones de factores que definen cada respuesta.

Cuadro 3. Matriz del diseño de experimentos.

Factores			Respuestas		
Material	Vsal (m/s)	Vrot (rpm)	ϵ_v ($\times 10^{-6}$)	ΔP (mmHg)	Q (L/min)
Peek	0,25	7 500	89,407	30,310	2,0142
Peek	0,25	10 500	145,99	67,288	2,0142
Peek	1,00	7 500	101,43	0,953	8,0568
Peek	1,00	10 500	208,33	15,723	8,0568
Pt	0,25	7 500	2,5525	30,014	2,0142
Pt	0,25	10 500	4,2946	67,719	2,0142
Pt	1,00	7 500	2,8966	0,984	8,0568
Pt	1,00	10 500	5,9384	16,117	8,0568
Peek	0,625	9 000	136,35	37,000	5,0355
Pt	0,625	9 000	3,8807	36,921	5,0355

Este primer análisis de varianza arroja que para la deformación volumétrica la interacción triple es la menos significativa, mientras que para la diferencia de presión la interacción triple no es significativa. Además, para el caudal la respuesta depende solamente del factor de velocidad de salida. En el caso de la curvatura, se obtiene que la deformación volumétrica y el caudal poseen un comportamiento lineal, mientras que para la diferencia de presión se rechaza la hipótesis nula de linealidad.

Un segundo análisis de varianza se realiza sin considerar la interacción triple (ABC) y los puntos centrales dentro del modelo. Esta decisión se toma debido a que se desea realizar una optimización en una respuesta continua al final del análisis. Si se mantienen los puntos centrales se discretiza la respuesta y se dificulta la optimización. En este segundo análisis se observa que para las respuestas es posible excluir la interacción doble entre la velocidad de salida y el material (BC).

Posteriormente, se realiza un tercer análisis de varianza sin considerar la interacción triple (ABC), los puntos centrales y la interacción doble entre la velocidad de salida y el material (BC), dando como resultado cuatro grados de libertad para el término de error. Los diagramas de Pareto de efectos estandarizados de las figuras 2 y 3 corresponden a las respuestas de deformación volumétrica y diferencia de presión. En estos diagramas se observa que los factores A, B, C, AB y AC son los más significativos.

Debe recordarse que, al depurar tres respuestas con el fin de realizar una optimización final, se agregan o eliminan interacciones entre factores simultáneamente en las tres respuestas. Por esta razón, la interacción doble BC se excluye gracias a que no es significativa en ninguna de las respuestas, condición que no se cumple con el resto de las interacciones dobles. En las figuras 2 y 3 se observa que las interacciones dobles AC y AB son significativas en las respuestas, por lo cual los gráficos de efectos principales son secundarios y la prioridad de interpretación se tiene en los gráficos de interacción entre factores.

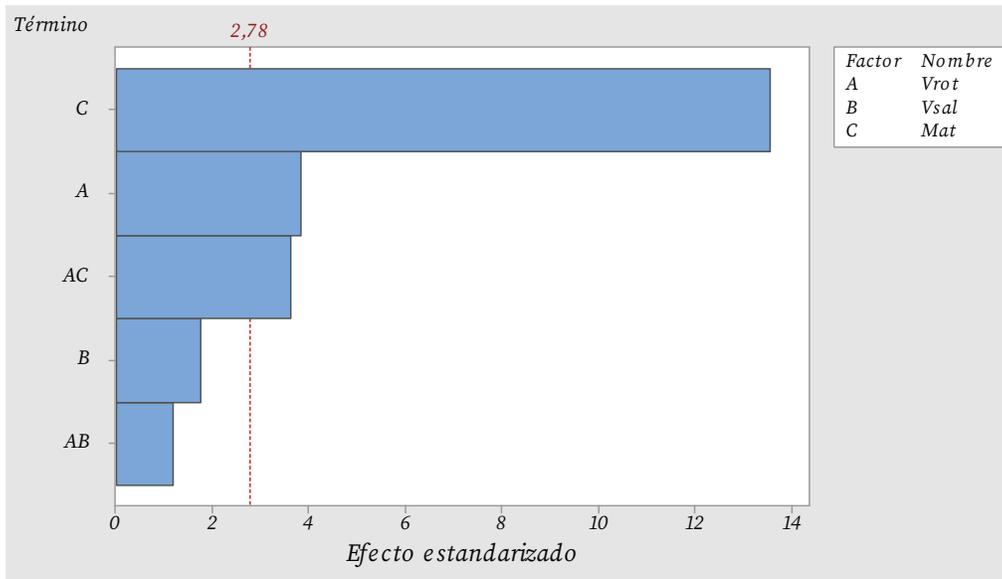


Figura 2. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la deformación volumétrica.

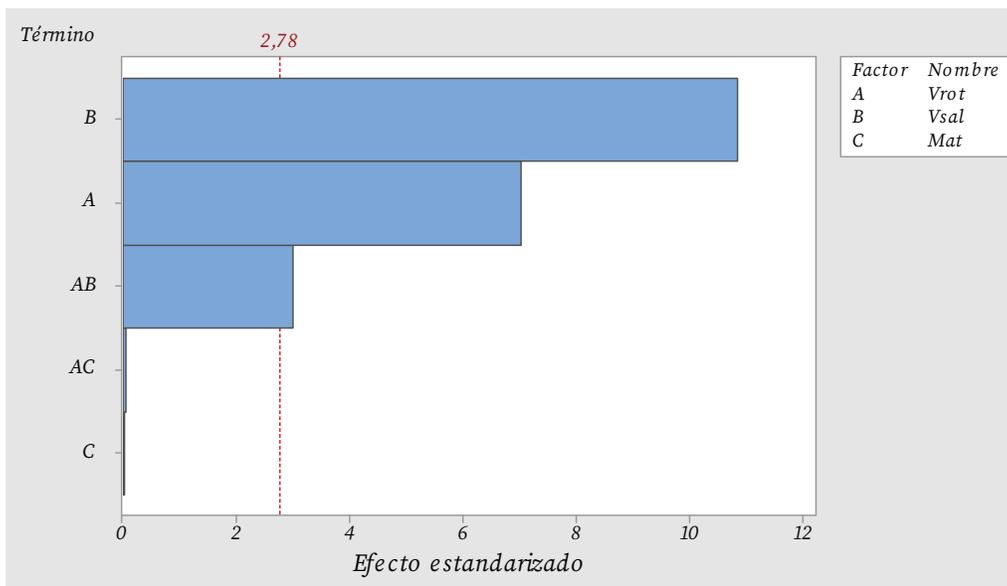


Figura 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la diferencia de presión.

En las figuras 4 y 5 se observan la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacciones dobles para la deformación volumétrica. La figura 4 muestra que la deformación volumétrica aumenta con el aumento de la velocidad de rotación y la velocidad de salida, siendo más

notorio el cambio en el caso de la velocidad de rotación. Sin embargo, el material es el factor más influyente en la respuesta, para el caso del Peek se obtienen los mayores valores de deformación volumétrica.

La interacción BC se incluye dentro de la figura 5, pero no dentro del modelo final, por lo tanto, se representa con un fondo gris. Se observa que en la interacción AB el valor de la deformación volumétrica aumenta al aumentar la velocidad de rotación, pero el incremento tiende a ser más pronunciado para la mayor velocidad de salida. Para el caso de la interacción AC, el aumento de la velocidad de rotación causa un incremento en la deformación volumétrica en el material Peek, mientras que para el Platino no se observa la interacción entre ambos factores.

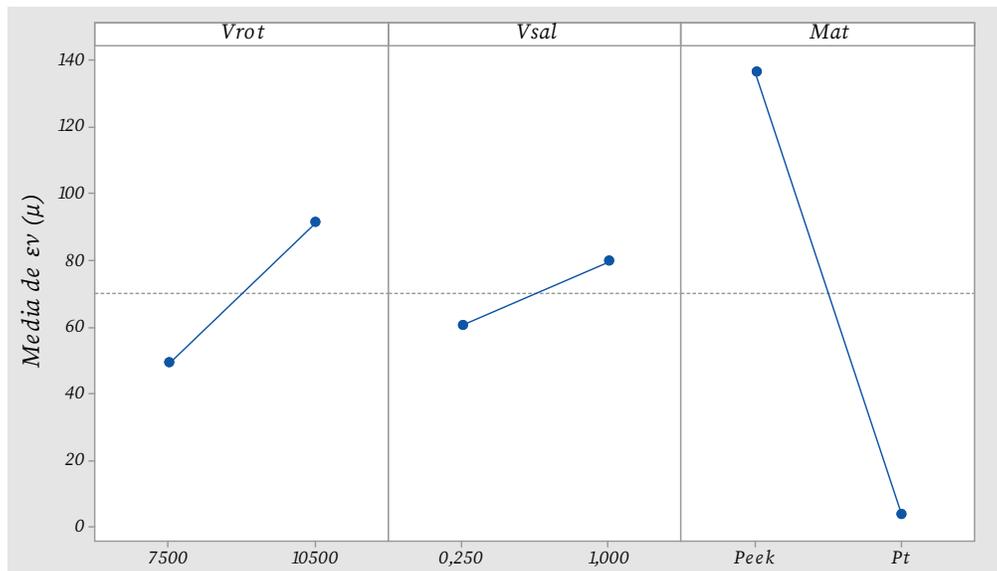


Figura 4. Gráfica de efectos principales para la deformación volumétrica.

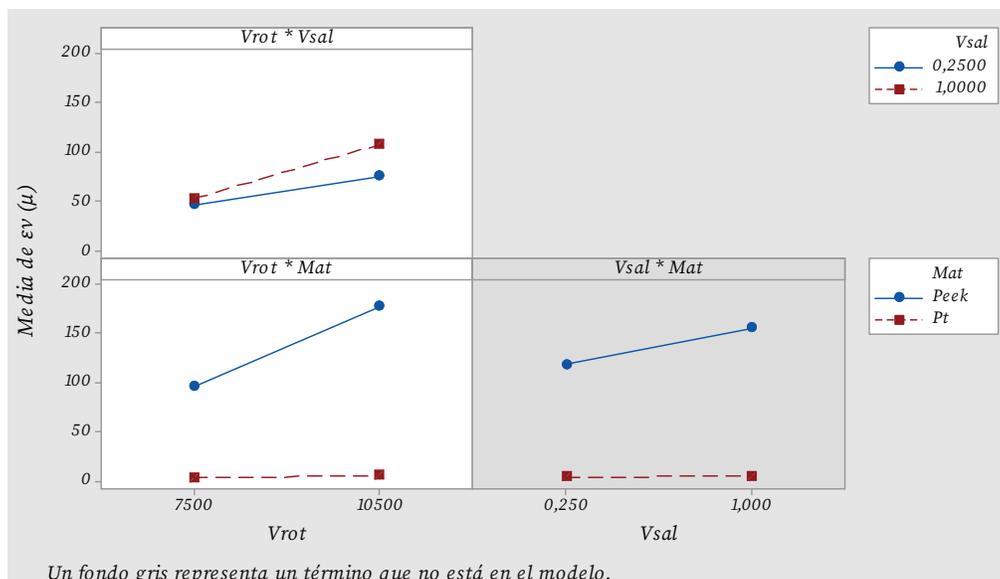


Figura 5. Gráfica de interacciones dobles para la deformación volumétrica.

En la figura 6 se presenta la gráfica de efectos principales para la diferencia de presión. El factor de la velocidad de rotación es directamente proporcional a la diferencia de presión, mientras que para la velocidad de salida la relación es inversamente proporcional. El factor del material muestra un efecto con una pendiente cercana a cero, por lo tanto, el material no influye en la respuesta de la diferencia de presión. En la gráfica de interacciones dobles de la figura 7, se obtiene que el valor máximo de A y mínimo de B provocan el valor máximo de la diferencia de presión, además de que la interacción AC no es significativa.

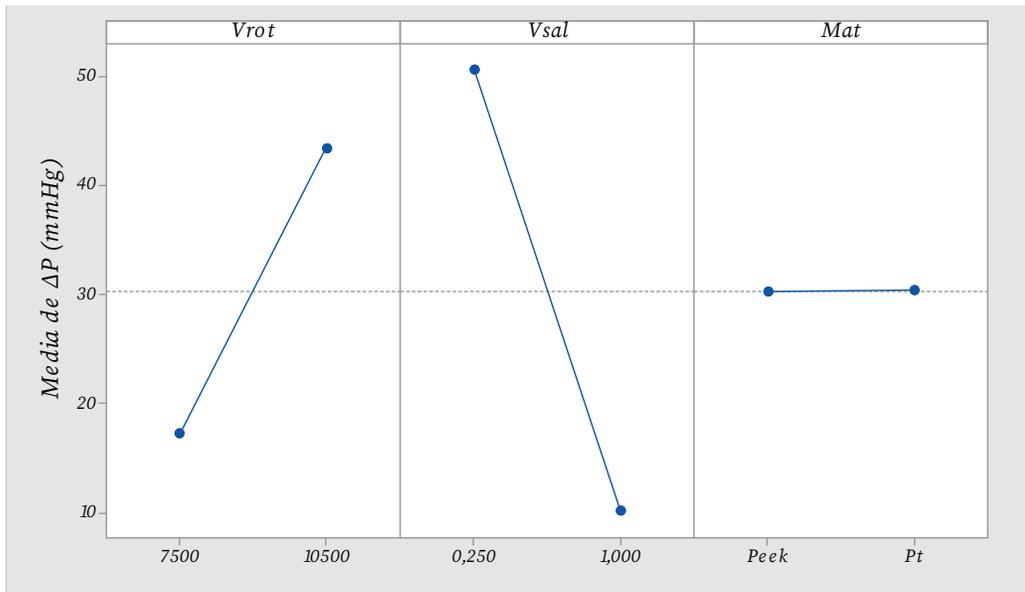


Figura 6. Gráfica de efectos principales para la diferencia de presión.

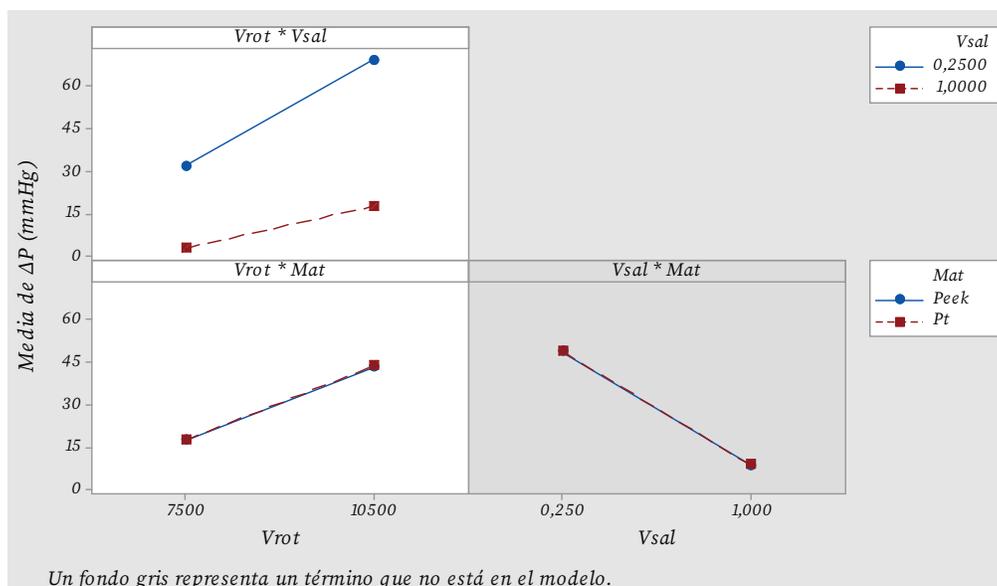


Figura 7. Gráfica de interacciones dobles para la diferencia de presión.

Para el caso de las ecuaciones de regresión, el coeficiente de determinación ajustado posee un valor de 95,91% para el modelo de ε_v , un valor de 95,00% para el modelo de ΔP y un valor de 100,00 % para el modelo de Q . Estos valores son superiores al 70% recomendado en la literatura [9]. Las ecuaciones de regresión 1, 2 y 3 correspondientes a cada respuesta se presentan a continuación:

$$\varepsilon_v (x10^{-6}) = -7,5 + 0,00685 A - 77,8 B + 52,8 C + 0,01147 AB - 0,01322 AC \quad (1)$$

$$\Delta P (mmHg) = -70,5 + 0,01493 A + 35,7 B - 0,8 C - 0,00995 AB \quad (2)$$

$$Q (L/min) = 8,057 B \quad (3)$$

Una vez obtenidos los modelos matemáticos se procede a la optimización de las respuestas según las especificaciones de la aplicación. Primeramente, se genera la gráfica superpuesta de contornos para las respuestas de caudal y diferencia de presión, la deformación volumétrica no se selecciona debido a que su valor se mantiene por debajo de 0.6 % en todos los casos. Además, el factor del material no tiene efecto en la diferencia de presión o el caudal, por lo que la gráfica es igual para el Platino o el Peek.

En la figura 8 se observa la gráfica superpuesta de contornos para el Peek tomando como límites del caudal un valor mínimo de 4 L/min y un valor máximo de 5,5 L/min, en el caso de la diferencia de presión el valor mínimo se establece en 40 mmHg y el valor máximo en 60 mmHg. La figura 8 permite observar que dichas especificaciones se cumplen únicamente para velocidades de rotación superiores a 9 273 rpm y velocidades de salida entre 0,4962 m/s y 0,6763 m/s.

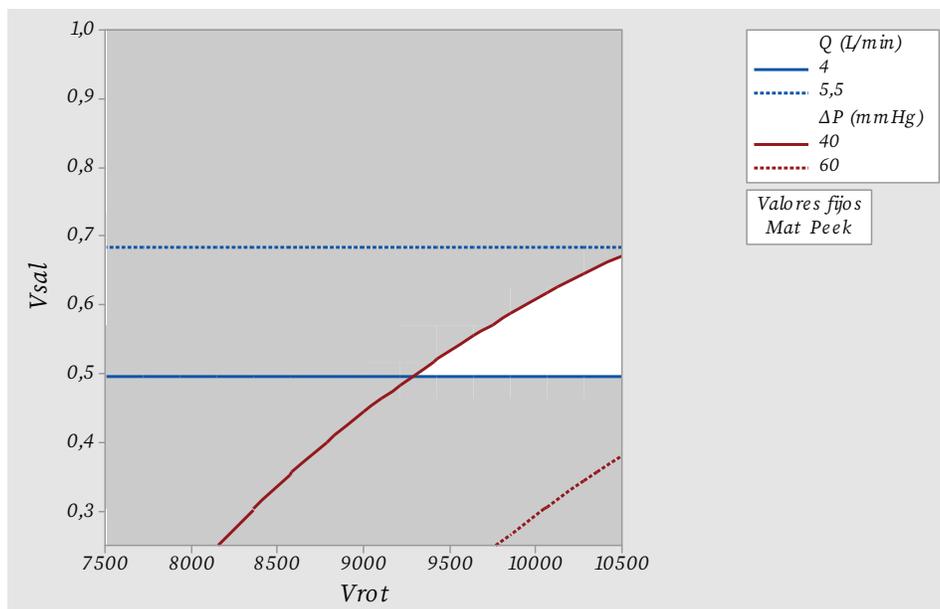


Figura 8. Gráfica superpuesta de contornos para las respuestas Q y ΔP .

Por último, se realiza la optimización del punto de operación del impulsor agregando una importancia mayor para las respuestas de caudal y diferencia de presión, mientras que a la respuesta de deformación volumétrica se le asigna una importancia menor. Para el caudal se definen dos especificaciones de 4 L/min y 5,5 L/min junto a la especificación de la diferencia de presión en 40 mmHg y la minimización de la deformación volumétrica. Los resultados se muestran en las figuras 9 y 10 donde se define la deseabilidad compuesta obtenida.

Para el caso presentado en la figura 9 de un caudal de 4 L/min y una diferencia de presión de 40 mmHg, la respuesta se optimiza para una velocidad de rotación de 9 258 rpm y una velocidad de salida de 0,4965 m/s. La diferencia entre el Platino y el Peek se genera principalmente con el valor obtenido para la deformación volumétrica, lo que produce una deseabilidad compuesta de 0,9987 para el Platino y de 0,8007 para el Peek.

En la figura 10 las especificaciones son de 5,5 L/min para el caudal y 40 mmHg para la diferencia de presión. La optimización de la respuesta se consigue con un valor de velocidad de rotación de 10 500 rpm y una velocidad de salida de 0,6827 m/s. De igual manera, la diferencia en la deseabilidad compuesta se debe a la respuesta de la deformación volumétrica. Para el Platino se obtiene un valor de 0,9909 y en el Peek un valor de 0,6690.

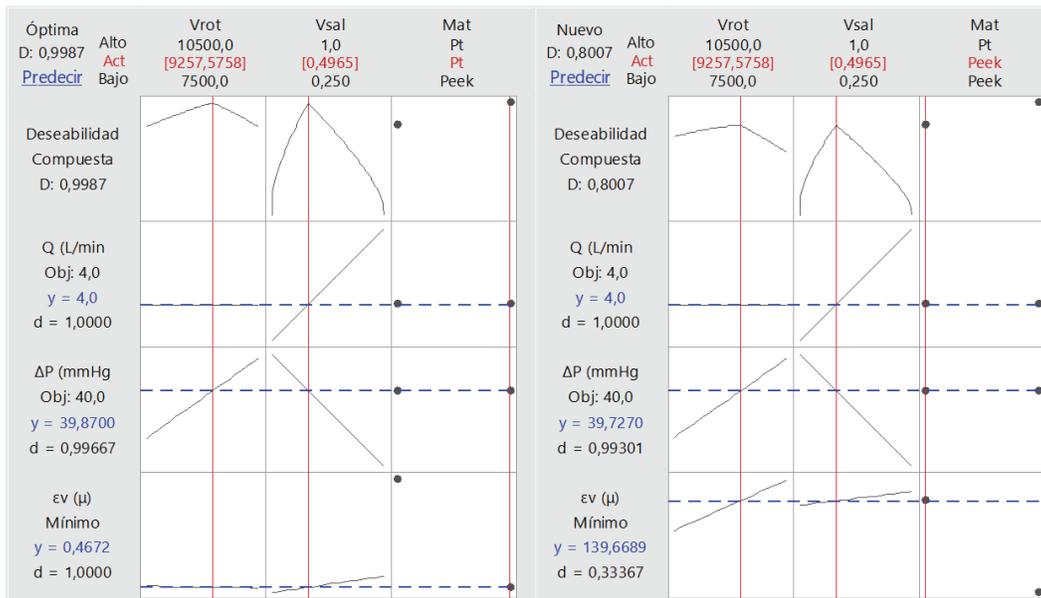


Figura 9. Gráficas de optimización para Q = 4 L/min, ΔP = 40 mmHg y ϵ_v mínimo.

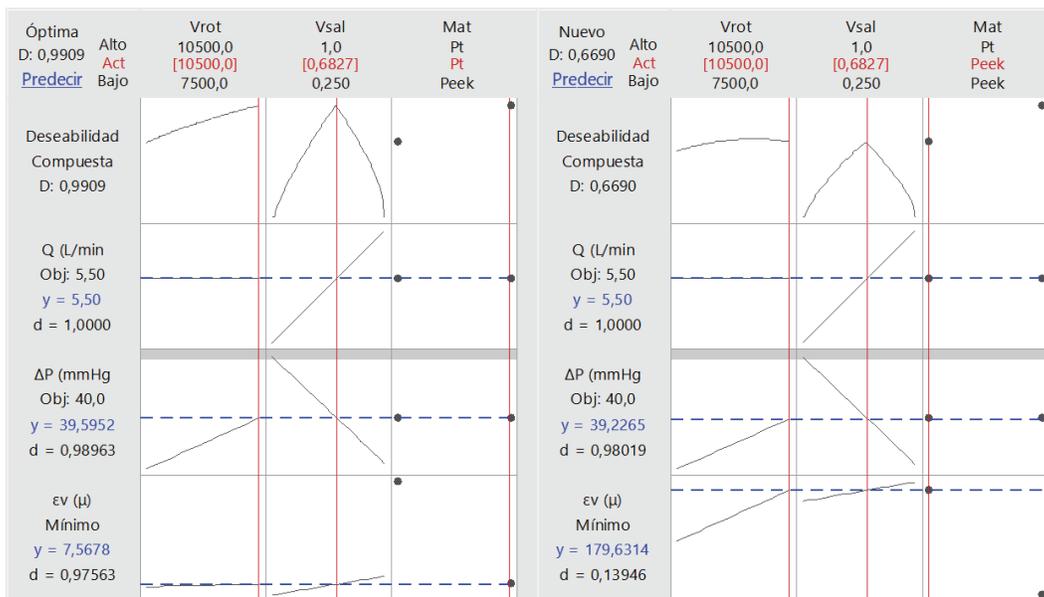


Figura 10. Gráficas de optimización para Q = 5,5 L/min, ΔP = 40 mmHg y ϵ_v mínimo.

Conclusiones y recomendaciones

Se define que el punto de operación óptimo para conseguir un caudal de 4 L/min y una diferencia de presión de 40 mmHg entre la entrada y la salida del impulsor axial sin eje central corresponde a una velocidad de rotación de 9 258 rpm y una velocidad de salida del flujo sanguíneo de 0,4965 m/s. Para cumplir con el requerimiento de la diferencia de presión mínima se requiere una velocidad de rotación superior a 9 273 rpm y una velocidad de salida mínima de 0,4962 m/s. Se recomienda que nuevos estudios realizados para el impulsor se concentren en la zona y puntos de operación obtenidos.

En el caso de las ecuaciones de regresión para las distintas respuestas, se obtiene una relación lineal entre el caudal y la velocidad de salida, dicho valor constante proviene de la sección transversal del conducto por donde fluye la sangre. En la respuesta de la deformación volumétrica los factores velocidad de rotación, material y su interacción doble son los más significativos estadísticamente. Para la respuesta de la diferencia de presión los factores que predominan en el modelo son la velocidad de rotación, la velocidad de salida y su interacción doble.

Se logra aumentar los grados de libertad para el cálculo del error al agregar los puntos centrales en la matriz de diseño del experimento. Al tratarse de resultados provenientes de simulaciones, en caso de requerir repeticiones completas del experimento se recomienda variar las características físicas de los materiales en un porcentaje similar a las variaciones de materiales comerciales. De esta forma, cada repetición se podría realizar con un conjunto de parámetros que corresponden a una muestra de material distinta.

Debido a que se plantea sustituir el Platino por un material polimérico se recomienda realizar el estudio con otros materiales poliméricos biocompatibles que sean aptos para la fabricación del impulsor. Esto podría facilitar la depuración del modelo matemático obtenido. De igual forma, se recomienda un análisis similar en las etapas posteriores de la investigación cuando se obtengan resultados provenientes de una planta que simule el comportamiento del sistema a nivel físico.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, "Enfermedades transmisibles y análisis de salud: Situación de salud en las Américas: Indicadores Básicos 2017", Washington, D.C., Estados Unidos.
- [2] M. A. Siman, J. Watson, J. T. Baldwin, W. R. Wagner, and H. S. Borovetz, "Current and future considerations in the use of mechanical circulatory support devices", *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 10, núm. 1, pp. 59–84, Ago. 2008, doi: 10.1146/annurev.bioeng.9.060906.151856.
- [3] M. Hosseinipour, R. Gupta, M. Bonnell, and M. Elahinia, "Rotary mechanical circulatory support systems", *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.*, vol. 4, p. 205566831772599, Jan. 2017, doi: 10.1177/2055668317725994.
- [4] L. W. Miller et al., "Use of a continuous-flow device in patients awaiting heart transplantation", *N. Engl. J. Med.*, vol. 357, núm. 9, pp. 885–896, Ago. 2007, doi: 10.1056/NEJMoa067758.
- [5] J. G. Rogers, et al., "Intrapericardial left ventricular assist device for advanced heart failure", *N. Engl. J. Med.*, vol. 376, no. 5, pp. 451–460, Feb. 2017, doi: 10.1056/NEJMoa1602954.
- [6] G. Ortiz, "Modelo de un nuevo concepto de impulsor para la aplicación en bombas para sangre", Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2017.
- [7] C. Mayorga, "Determinación computacional del comportamiento fluido-estructura de un impulsor en flujo sanguíneo", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2018.
- [8] J. Muñoz, "Determinación computacional de la fatiga en un impulsor axial sin eje central en flujo sanguíneo", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2021.
- [9] V. Jagota, A. P. S. Sethi, and K. Kumar, "Finite element method: An overview", *Walailak Journal of Science and Technology*, vol. 10, núm. 1, pp. 1–8, Feb. 2013, doi: 10.2004/wjst.v10i1.499.

- [10] R. C. Hibbeler, "Mechanics of materials", 9th ed, NJ, USA: Pearson Education, 2014.
- [11] A. Bedford, and K. Liechti, "Mechanics of materials", 2nd ed, Switzerland: Springer Nature, 2020.
- [12] H. Gutiérrez Pulido, and R. de la Vara Salazar, "Análisis y diseño de experimentos", 3rd ed, México: McGraw-Hill, 2012.
- [13] D. Montgomery, "Diseño y análisis de experimentos", 8th ed, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [14] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, "Metodología de la investigación", 6th ed, México: McGraw-Hill, 2014.
- [15] K. J. Bathe, H. Zhang, and S. Ji, "Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions," *Comput. Struct.*, vol. 72, no. 1–3, pp. 1–16, Jul. 1999, doi: 10.1016/S0045-7949(99)00042-5.
- [16] J. C. Pedro, and P. Sibanda, "An Algorithm for the Strong-Coupling of the Fluid-Structure Interaction Using a Staggered Approach," *ISRN Appl. Math.*, vol. 2012, pp. 1–14, Jun. 2012, doi: 10.5402/2012/391974.
- [17] M. R. Hasniyati, H. Zuhailawati, and S. Ramakrishnan, "A Statistical Prediction of Multiple Responses Using Overlaid Contour Plot on Hydroxyapatite Coated Magnesium via Cold Spray Deposition," *Procedia Chem.*, vol. 19, pp. 181–188, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROCHE.2016.03.091.

Manejo reproductivo en hatos bufalinos

Reproductive mananagement in buffalo herds

David Campos-Jiménez¹, Esteban Garro-Monge², Valery Jiménez-Benavides³, Pablo Mora-Gamboa⁴, Mónica Madrigal-Valverde⁵

Fecha de recepción: 24 de abril de 2021

Fecha de aprobación: 11 de julio de 2021

Campos-Jiménez, D; Garro-Monge, E; Jiménez-Benavides, V; Mora-Gamboa, P; Madrigal-Valverde, M. Manejo reproductivo en hatos bufalinos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 60-72.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5634>

- 1 Estudiante de la Escuela de Ingeniería en Agronomía, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: davidcampos@estudiantec.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-8550-9409>
- 2 Estudiante de la Escuela de Ingeniería en Agronomía, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: garromongee@estudiantec.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-4981-1555>
- 3 Estudiante de la Escuela de Ingeniería en Agronomía, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: valyjb17@estudiantec.cr.
 <https://orcid.org/0000-0001-8575-8053>
- 4 Estudiante de la Escuela de Ingeniería en Agronomía, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pablomora@estudiantec.cr.
 <https://orcid.org/0000-0001-9090-4326>
- 5 Área académica del doctorado en ciencias naturales para el desarrollo. Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mmadrigal@itcr.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-4688-0627>

Palabras clave

Nutrición; estacionalidad; eficiencia reproductiva; salud de hato; *Bubalus bubalis*.

Resumen

La actividad bufalina ha ido en aumento en los últimos años, mostrando cada vez más productores enfocados al sistema de producción de esta especie en América Latina. El objetivo de esta revisión fue recopilar conocimientos existentes en la literatura sobre el manejo y las biotecnologías reproductivas disponibles para los machos y las hembras de la especie *Bubalus bubalis*. La información fue seleccionada de libros y artículos científicos en bases de datos académicas y Google Scholar, durante un periodo de cinco meses (marzo-julio 2020). Se abarcaron los temas de manejo reproductivo de la hembra, el macho y las biotecnologías aplicadas a la especie. Se determinó que la eficiencia productiva de los búfalos está fuertemente relacionada con el manejo a nivel nutricional, reproductivo y de bienestar animal, asimismo de los factores climáticos en el que se desarrollan. Se evidenciaron avances de las biotecnologías aplicadas a la reproducción bufalina.

Keywords

Nutrition; reproductive biotechnologies; seasonality; reproductive efficiency; *Bubalus bubalis*.

Abstract

Buffalo production has increased mainly over the past years, more farmers have been dedicated to the production system of this species in Latin America. The objective of this review is to compile scientific literature corresponding to reproductive management and biotechnologies available for *Bubalus bubalis* bulls and cows. The information was gathered from books and scientific articles from academic databases and Google Scholar in a span of 5 months (March-July). Reproductive management of cows, bulls and biotechnologies applied to the species were covered. It was determined that productive efficiency of buffalos is strongly related to nutritional, reproductive, and animal welfare management, as well as environmental factors were this species develops. Improvements in biotechnologies applied to the buffalo reproduction were evince.

Introducción

La producción de búfalos ha ido en aumento en América Latina en los últimos 20 años. En el año 2001 se estima que la población de búfalos en América superaba ligeramente los 3,3 millones animales [1]. Para el 2007, se estima que la población de búfalos incrementó cerca de los 4 millones de animales en América Latina y el Caribe, siendo Brasil el país número uno en la producción de estos animales seguido por países como Argentina, Venezuela, Cuba y Colombia [1] [2]. Aun así, el seguimiento de esta especie en los países Latinoamericanos ha sido variable y su población real en la región es incierta.

En cuanto a Costa Rica, los primeros búfalos fueron introducidos en el año 1974 y fueron adquiridos animales del grupo racial Bufalypso, los cuales fueron distribuidos en diferentes partes del país [3]. En el año 2007 la especie bufalina estaba distribuida por todo el territorio nacional; sin embargo, a nivel productivo estos estaban siendo subexplotados por parte de los productores [3]. El búfalo tradicionalmente ha sido manejado de manera similar a los bovinos a pesar de que aspectos de comportamiento y fisiología difieren de manera considerable, contando los bufalinos con una mayor adaptabilidad al medio ambiente [4][5].

Por lo anterior, es de vital importancia establecer claramente las diferencias entre las especies bufalinas y bovinas. Es requerido comprender el comportamiento reproductivo tanto de la hembra como del macho bufalino, para así determinar y orientar sobre cuáles son los factores que tienen el mayor peso e influencia para permitir una ciclicidad y tiempo de servicio adecuado. Los búfalos son susceptibles ante diversos factores, como lo son los factores climáticos, donde se ha determinado la influencia de la temperatura ambiental y de las precipitaciones sobre la estacionalidad del ciclo reproductivo y calidad seminal [6] [7] [8]. Por otra parte, los bufalinos presentan menores incidentes y trastornos reproductivos comparados con otras especies, como por ejemplo los bovinos, por lo que esta especie es de interés por su capacidad de resistencia ante ciertas enfermedades y patologías reproductivas [8] [9].

En cuanto a las biotecnologías reproductivas la inseminación artificial (IA) ha sido una de las biotécnicas más difundidas y empleadas; no obstante, ha presentado problemas debido a que el estro de las búfalas es más discreto que en hembras cebuinas, debido a la variación en el momento de ovulación y por poseer un carácter reproductivo estacional. La inseminación artificial a tiempo fijo (IATF) ayuda a solucionar algunos de estos problemas, ya que sincroniza los eventos de la fase lútea, el crecimiento folicular y la ovulación, lo que hace que se insemine en un momento específico [10]. Además, se han estudiado en búfalos biotecnologías reproductivas como la transferencia de embriones, aspiración folicular guiada con ultrasonido y producción de embriones *in vitro* [10]; todas estas están en función de la colecta, evaluación y criopreservación del semen. Por ello el objetivo de esta revisión es evidenciar los conocimientos existentes sobre el manejo del hato y de las biotecnologías reproductivas disponibles para hembras y machos de la especie *Bubalus bubalis*.

Materiales y métodos

La información utilizada para la presente investigación bibliográfica fue recopilada durante un periodo de cinco meses (marzo-julio del año 2020). Los documentos de texto incluidos en la presente revisión fueron recopilados de libros y artículos científicos de las bases de datos académicas suscritas del Tecnológico de Costa Rica, complementada con documentos presentes en la plataforma Google Scholar. Esta revisión bibliográfica se encuentra dividida en las siguientes secciones: Manejo reproductivo del macho bufalino, manejo reproductivo de la hembra bufalina y biotecnologías reproductivas.

Resultados

Manejo reproductivo del macho bufalino

El conocimiento de las características, desarrollo y manejo reproductivo de una especie doméstica es de gran interés para conducir en esta la eficiencia productiva y por ello la especie bufalina no es una excepción, en los sistemas de producción animal el macho influye en un 50% en la reproducción del hato y debido a esto se debe ofrecer al animal los cuidados indispensables para obtener mejores y mayores índices de eficiencia reproductiva. Actualmente, la influencia del macho es cada vez más sobresaliente en la fertilidad y fundamental en el mérito genético de las explotaciones pecuarias [7] [11].

En el caso de los búfalos seleccionados como reproductores estos deben cumplir una serie de requisitos como lo son: tener una nutrición apropiada, un buen estado tanto físico como de salud, incluyendo el criterio de temperamento (lo menos agresivos posibles), un buen desarrollo del sistema genital y poseer calidad seminal requerido para este fin, por ende, de una óptima madurez sexual y adecuados periodos de servicio y descanso [11]. Además, existen factores

ajenos al animal como lo son las horas de luz ambiental, esto debido al comportamiento reproductivo estacional presente en esta especie, ya que estos poseen poca protección al sol y estar expuestos a este repercute negativamente a nivel físico y reproductivo [7][12].

Como se mencionó anteriormente, la salud toma un rol importante en el manejo reproductivo del macho, por lo que se deben tener presente ciertas medidas de prevención como lo es la realización de exámenes de sangre, la desparasitación, y un programa de vacunación [12], en el caso de este último elemento cabe señalar que se deben tener los cuidados respectivos en cuanto a las agujas utilizadas, para así evitar la diseminación de alguna enfermedad, por lo tanto se recomienda emplear una por animal [13]. Cabe señalar que esta especie pese a poseer una gran rusticidad también es susceptible a enfermedades, como lo son la brucelosis (*Brucella abortus*), la leucosis enzoótica bovina, rinotraqueítis infecciosa bovina (IBR) y leptospirosis (*Leptospira sp*), las cuales presentan una seropositividad del 2,6%, 1,3%, 40% y 39% respectivamente [14]. En cuanto a *Brucella abortus* y el virus de la leucosis, estas generan gran afectación a la producción, ya que producen trastornos en el aparato reproductor [15], en el macho la afección se da a nivel de vesículas seminales y en el epidídimo, por lo que provoca una disminución en la reproducción [16]. Por otra parte, el IBR afecta de manera localizada generando una inflamación en el prepucio [14][16], teniendo una incidencia de 40% en el ganado bufalino [17]. En el tópico para el estado físico se deben tomar en cuenta la condición de los aplomos y de las pezuñas, siendo criterios requeridos que estas sean redondas y posean casco plano, mientras que la condición de las patas delanteras es que estas deben ser delgadas, pero lo suficientemente fuertes y sus cuartos traseros deben tener buen desarrollo y conformación, por lo que sus huesos son fuertes y sus articulaciones sanas [13]. A su vez, se debe tener presente que dichas características morfológicas cuentan con heredabilidades medias, por lo que se pueden seleccionar las características más aptas y consecuentemente ser transmitidas a la progenie para generar un mayor rendimiento en la reproducción [13].

De igual manera, existen variables que se pueden mejorar y que influyen en el éxito reproductivo como lo es la edad a la primera monta o madurez sexual del animal, esta puede darse desde los 18 meses de edad; sin embargo, se debe iniciar con la cubrición a los dos años de edad, ya que en este momento es cuando se da la aparición de los espermatozoides viables en el eyaculado del macho; este criterio varía de acuerdo a la raza, en el caso de los grupos raciales bufalinos, los animales pueden presentar espermatozoides en el eyaculado a los 23 meses de edad [18]. No obstante, tan importante es la edad como el peso del animal para iniciar la monta y por tanto se reporta que los animales deben tener como promedio de peso vivo 455 kg, tal peso se obtiene en animales con una alimentación a base de pastos y suplementos minerales a los 23 meses de edad [19].

Consecuentemente con lo anterior, el periodo de intervalo entre partos se encuentra influenciado por la duración del periodo de servicio, debido a que en cuanto más extenso el periodo en que tarda la hembra en que concebir será proporcional la duración del IEP y menor la tasa de nacimientos del rebaño, idealmente la hembra de preñarse entre dos a tres meses posparto [20].

Por lo que deben tomarse algunas consideraciones previo al servicio para garantizar la preñez de la hembra durante el periodo de tiempo mencionado, se deben realizar una serie de exámenes pertinentes al estado del animal, como lo son los análisis andrológicos para conocer la capacidad reproductiva y el buen funcionamiento del sistema genital masculino, además de la verificación de la libido y las cualidades del semen de este [21]. Uno de los parámetros biométricos de mayor interés en la evaluación de los testículos es la circunferencia escrotal (CE), la cual está correlacionada con el volumen de semen producido, del cual se pueden generar mayor número de espermatozoides, también poseen una relación con una menor precocidad

de las hijas del animal, pero para que sea posible esta medición debe estar por encima de los 30 cm a los 2 años de edad [21], por lo anterior la CE del progenitor cobra importancia en el manejo de hatos bufalinos, sin embargo es un parámetro poco estudiado [22].

Adicionalmente, el semen debe ser analizado de manera macroscópica y se toman en cuenta parámetros de color y densidad seminal, ya que se califican como muy buenas aquellas relaciones de concentraciones ($\text{espx}10^9/\text{ml}$) mayores a 1000, con densidades cremosas o espesas y malas cuando tienen una concentración menor a 400 [23]. Además, se debe mencionar que el volumen del eyaculado está asociado con la edad del macho. Complementario a lo anterior, como parte de estos parámetros se tiene que el pH debe estar en un rango de 6,4-7,0 para que los espermatozoides sean viables [23].

Por otra parte, se realiza un análisis microscópico, en el cual se determina la motilidad tanto masal como individual, la concentración, el vigor espermático y la vitalidad, con estas variables es posible estudiar la viabilidad que tendrá el individuo como macho reproductor [22]. Cabe destacar que los parámetros microscópicos son determinantes en la capacidad de fertilización del semen. A mayor cantidad de defectos en cuanto a forma o movilidad, mayor será la infertilidad del eyaculado. Dichas anomalías pueden deberse a varias causas que van desde una espermatogénesis defectuosa heredada, enfermedades, reposo sexual prolongado o bien el estrés por el calor que se genera en los búfalos [22] [23].

En cuanto al manejo nutricional del ganado bufalino y sus efectos sobre la reproducción machos de esta especie es escasa [24][25]. Sin embargo, Singh (2013) y Paul (2011) mencionan que los machos con bajas condiciones corporales, o bien con sobrepeso, muestran una disminución de su libido a la hora de la monta; además, muestran deficiencias en la calidad del semen. Por otro lado, se han correlacionado dietas con contenidos bajos en proteína con problemas de volumen y motilidad espermática, así como a retrasos de entrada a la pubertad en esta especie, asimismo, el subestimar la necesidad de energía pueden ocasionar la reducción de la espermatogénesis y afectar la morfología y conformación testicular [24] [26].

La suplementación mineral y vitamínica se ha relacionado con mejoras sobre las cualidades del semen en búfalos. Por ejemplo, la suplementación en las dietas con vitamina E, A, D y selenio (Se) han resultado en una mejoría morfológica del semen de búfalo [26] [27]. Otros minerales como el magnesio (Mg), cobre (Cu), calcio (Ca) y zinc (Zn) se han correlacionado con un mayor volumen y concentración espermática, mejoras en la motilidad, la vitalidad y la capacitancia acrosomal de los espermatozoides, asimismo, se indica una disminución de reacciones de oxidación del semen [26] [28]. Sumado a lo anterior, dietas con suplementación de metionina y lisina se han correlacionado con una mejoría en el volumen, concentración y vitalidad de espermatozoides en el eyaculado, una mejora en la motilidad y morfología tanto pre como postcongelación [29].

En síntesis, la reproducción del macho bufalino juega un papel importante dentro del hato, por lo que se debe dar el correcto manejo y registro de diversos factores que influyen en esta, como lo es el estado físico, nutricional y de salud [19] [30]. El identificar los momentos óptimos debido a la edad, estacionalidad y cualidades óptimas del semen son de gran importancia para lograr un correcto manejo reproductivo.

Manejo reproductivo de la hembra bufalina

La producción animal depende en gran medida del éxito que haya dentro del manejo reproductivo que se dé a los animales. En el sistema de producción de búfalos, la eficiencia reproductiva es uno de los principales factores que afectan a la productividad de la hembra, como lo es el inicio tardío de la pubertad, la estacionalidad de nacimientos, la poca expresión del estro, el anestro postparto, así como el intervalo que hay entre los partos [31]. Estos

problemas se pueden atribuir a ciertos factores como lo son los cambios en la estacionalidad de las lluvias, el estrés térmico, así como también los cambios en el fotoperiodo, influenciados por las variaciones en la secreción de melatonina [8].

Las búfalas son animales poliéstricas estacionales de fotoperiodo corto, el intervalo entre ciclos estrales tiene una duración de 16 a 32 días, a su vez, se reporta que las búfalas presentan un predominio de dos a tres ondas foliculares por ciclo [31]. La actividad sexual tiende a darse en horas de poca luz y temperaturas bajas. En las zonas tropicales, donde se da un fotoperiodo constante, la época reproductiva se ve muy influenciada por los cambios en las precipitaciones anuales, donde a su vez se le atribuye a la calidad y disponibilidad del forraje, debido a esto la mayor cantidad de nacimientos se engloba en épocas de mayor abundancia de biomasa, generalmente en el segundo semestre del año [8].

Por otra parte, el estro en las búfalas se presenta por primera vez entre los 24 a 36 meses de edad, por lo que el promedio del primer parto se da entre los 3 o 4 años de edad; en esta especie es difícil detectar el estro, el cual puede llegar a tener una duración de 18 horas, así como tiende a manifestarse en las horas de la noche. Por lo que, la mejor manera para detectarlo es por medio del uso de un macho, ya que el animal logrará percibir los pequeños cambios hormonales que se dan en la hembra [32]. Por lo tanto, al presentar un estro muy discreto no siempre se logra la observación de algún síntoma; sin embargo, pueden mostrar bramidos y micciones frecuentes, descargas vaginales, edematización de la vulva, hiperemia vaginal, levantamiento de la cola, montas entre otras o reflejo de inmovilidad al ser montada, entre otros síntomas [33].

El periodo de gestación en la especie bufalina tiene una duración de 310 a 330 días, en el cual se tiene una cría por parto. El puerperio tiene una duración cerca a los 25 días después del parto, con un rango de duración entre los 15 a 66 días, lo que indica que esta especie bajo buenas condiciones presenta un reinicio a la actividad reproductiva temprana comparada a los bovinos. A su vez, se reporta un reinicio de la actividad ovárica temprana, manifestándose el primer estro postparto hacia los 30-45 días. A su vez, se considera un intervalo de parto promedio cercano a los 13 meses [33].

Por su parte, la prevalencia en los desórdenes y patologías reproductivas en búfalos se dan en menor medida comparado con el hato bovino, estos son animales más rústicos y resistentes ante distintos problemas; no obstante, en estos se pueden presentar trastornos en la repetición del estro, el anestro, el prolapso genital, abortos, nacimiento de crías débiles, natimortos, la retención placentaria, la torsión uterina y la distocia, a su vez, la susceptibilidad ante estas patologías se atribuye a cuestiones de temperatura elevada, alta humedad en el ambiente y a la baja disponibilidad del forraje [9].

Dentro de las patologías reproductivas que se pueden presentar se pueden asociar con la presencia de agentes infecciosos como la Diarrea Viral Bovina (DVB), Herpes Virus Bovino tipo 1 y 4 (HVB-1 y HVB-4), *Leptospiría spp*, *Chlamydia psitacci*, *Campylobacter spp.*, *Trichomona* y *Brucella abortus*, además de parásitos como *Neospora caninum* y *Criptosporidium* [34]. A causa de esto, los fetos pueden morir en el útero, ser reabsorbidos, autolisiados e incluso pueden nacer vivos, pero con mucha debilidad, además de presentarse momificación fetal, nacimientos prematuros, placentitis, disentería y fiebre aguda en los animales [9].

Como se ha mencionado brevemente, el manejo nutricional influye en la eficiencia reproductiva de las hembras bufalinas. A grandes rasgos, las búfalas que reciban dietas desbalanceadas son propensas a tener impactos negativos sobre su fertilidad. Una mala condición corporal de las búfalas durante la gestación se ha vinculado a intervalos posparto mayores, una reducción en la tasa de preñez, un incremento en los servicios por animal y consecuentemente, a un menor rendimiento productivo [4] [35] [36]. En cambio, Aggarwal y Upadhyay (2013) comentan

que las hembras con condiciones corporales cercanas a 3,5 se han relacionado a mejores respuestas de protocolos de inseminación a tiempo fijo, dentro de la misma línea Quereshi (2009) menciona que la tasa de preñez aumenta significativamente al mantener condiciones entre 3,0 y 4,0.

En cuanto la calidad nutricional y composición de las dietas, las búfalas disminuyen aspectos reproductivos deseables debido a dietas con niveles muy altos o muy bajos de proteína y por dietas de baja energía durante todas las etapas de su desarrollo, a pesar de esto, se debe prestar principal atención a esos dos factores durante el último tercio de la gestación y los primeros 3 meses posparto. Algunos de los resultados de Qureshi et al. (2002) mencionan que para búfalas de la raza Nili-Ravi, las relaciones de proteína cruda (PC) y energía metabolizable (EM) cercanas 11,9 g PC/MJ EM mantuvieron en promedio retornos a ovulación posparto iguales o menores de 75 días, en cambio dietas de PC/EM mayores o menores a este valor alargaron el período de retorno de ovulación. En general, se ha encontrado que las dietas balanceadas en componentes de proteína cruda y energía, acompañadas de suplementación mineral, han demostrado disminuir la cantidad de servicios por preñez, también se ha vinculado mejorías sobre los periodos al primer parto, tasas de preñez y a nivel productivo desde la influencia de las dietas, ya sea positiva o negativamente, en la composición de la leche [36] [37] [38] [39].

Otro factor importante para el correcto manejo reproductivo de la hembra es la suplementación mineral y vitamínica. En cuanto a minerales, la relación de calcio (Ca) y Fosforo (P) son de gran importancia, especialmente durante el último tercio de la gestación. En esta etapa, una inadecuada relación Ca:P puede causar desórdenes de interacción con otros minerales, ocasionando problemas reproductivos como prolapso uterino o vaginal, retención de placenta, calcemia posparto, infertilidad, retraso o repetición del estro e incrementado desordenes en la salud del animal [38][39][40]. Sobre esto Terramoccia et al. (2005) hacen referencia a que una relación óptima de Ca:P debe ser 1:1.1 durante el último tercio de gestación [38]. En cuanto a la suplementación vitamínica, los búfalos son capaces de sintetizar vitaminas del complejo B, K y C, pero no las vitaminas A, D y E las cuales deben ser incorporadas en la dieta en todas las etapas de desarrollo y producción [41] [42].

En síntesis, el éxito reproductivo de las hembras bufalinas está situado en gran parte por la selección de las reproductoras, así como de su genética; sin embargo, también se debe considerar factores como el manejo nutricional, la temperatura, el fotoperiodo, la humedad relativa y el periodo de precipitaciones que se presente en la zona, ya que todos estos factores intervienen significativamente en el ciclado de la hembra [8]. Es por ello por lo que se debe de dar un buen control y estudio en registros, coordinación y búsqueda de prácticas que permitan dar al animal las mejores condiciones para poder brindar un buen rendimiento productivo [8] [9].

Biotecnologías reproductivas

Existe una amplia gama de biotecnología reproductivas, con estas se busca aumentar la eficiencia de la producción sea lechero o de cría, más no todas se pueden implementar en esta especie. Se describirán a continuación la colecta de semen, sistemas CASA para análisis semen, inseminación artificial, inseminación artificial a tiempo fijo, aspiración folicular, fertilización in vitro y transferencias de embriones.

Colecta y preservación seminal

Es el primer proceso para llevar a cabo la inseminación artificial [43], este puede llevarse a cabo por medio de la utilización de un electroeyaculador o de una vagina artificial [44] [45] [46]. El semen es eyaculado en un tubo graduado con una cubierta protectora para evitar los rayos UV y los cambios bruscos de temperatura [44]; Canizales 2011 menciona que el macho de esta

especie es quizás una de las especies domésticas más fáciles de entrenar para la extracción seminal a través de la vagina artificial. Por otro lado, dice que 2 eyaculados seguidos cada 3,5 días a partir de los 30 meses de edad estimula no solo el volumen del eyaculado, sino que también la producción de espermatozoides y agrega que el descanso nocturno es suficiente para mantener el número de espermatozoides.

Los eyaculados son analizados bajo criterios de forma y movimiento, las muestras con altos parámetros de calidad seminal (motilidad > 30%, espermatozoides normales > 70%) [47], pueden ser preservadas, ya sea por medio de la refrigeración o de la congelación. Para realizar el proceso de criopreservación, el semen se diluye posterior a su colecta en un diluyente que contiene crioprotectores que minimizan la muerte de los espermatozoides durante el congelamiento [45], la dilución es realizada para alcanzar una concentración específica de 10-60 millones de espermatozoides por mililitro [47] [46], posteriormente las dosis de semen son sometidas a un tiempo de equilibrio de 4 horas a 4 °C 16, después de este proceso las dosis son sometidas a vapores de nitrógeno por 10 minutos y consecuentemente son sumergidas en nitrógeno líquido a -196 °C [46].

Análisis seminal asistido por computadora (CASA)

Para evaluar la capacidad fecundante de los espermatozoides se pueden hacer pruebas macroscópicas, microscópicas y análisis computarizado de semen (CASA) [43][44]. Este último análisis mezcla las capacidades de los equipos y le agrega capacidades de software para el análisis de las características del semen. Los análisis mediante CASA tienen la ventaja de medir variables comunes de movimiento de los espermatozoides, pero agrega la posibilidad de estudiar parámetros cinéticos como velocidad y trayectoria; o morfológicos como tamaño. De manera sistemática, la capacidad de sistematización reduce la variación técnica de los análisis y permite realizar análisis cuantitativos sobre las cualidades del semen [43]. Otros análisis más especializados como vitalidad por fluorescencia y fragmentación del ADN de los espermatozoides también son posibles [43]. El uso de análisis CASA en la especie bufalina ha permitido un mayor alcance sobre el conocimiento reproductivo de la especie bufalina, además, las ventajas y constante mejoras que se le atribuyen a esta técnica de análisis hace que sea cada vez más utilizada no solo a nivel investigativo, sino también a nivel productivo[48].

Inseminación artificial (IA)

Esta biotecnología es una de las más investigadas en el mundo, según Vale (2011) esta técnica consiste en introducir una sonda a nivel cervical, la cual deposita el semen en el cuerpo del útero, tanto en vacas como búfalas; no obstante, por las diferencias anatómicas de las búfalas (tamaño del cérvix) se deben tener algunos cuidados especiales cuando se ejecuta.

La IA es además la biotecnología reproductiva más antigua, pero no fue hasta 1955 que se reportó la primera IA en búfalas [32]. En Colombia en 1976 tuvieron las primeras experiencias con esta técnica; sin embargo, se dejó de implementar por un número considerable de experiencias desagradables y fracasos[49]. Vale (2011) recomienda evitar la IA en búfalas, ya que provoca lesiones con sangrado y bajos índices de fertilidad debido a que presentan un cérvix pequeño. Por otro lado, Berdugo (2012), dice que implementar IA es un problema importante en hembras jóvenes, pero que se puede solucionar seleccionando hembras con cérvix grueso y una exhaustiva palpación de la sonda. Inclusive se ha estudiado el rendimiento reproductivo de la IA en ganado bufalino empleando semen sexado [48][50], 117 lo cual indicó tasas de preñez satisfactorias y similares al semen no sexado.

Desde las primeras investigaciones y hasta 2012 la tasa de preñez promedio se ha mantenido en 30%, en términos prácticos quiere decir que se necesitan tres IA para obtener una cría [49]. Por otro lado, la estacionalidad (incluso en el trópico) juega un papel importante en la fertilidad, hay una diferencia de hasta 31% cuando se insemina en época fértil con respecto a la época no fértil. La detección del estro es determinante, ya que los signos de estro no son tan evidente como en vacas *Bos taurus*, lo que conlleva a bajas tasa de fertilidad [32].

Por lo anterior, el uso de un toro marcador se vuelve indispensable para la detección del estro, debido a que el comportamiento homosexual en esta especie es solo de 3,44% [32]. A estos toros se les practica una cirugía para extraerle el epidídimo, por lo que este puede no solamente montar a la hembra, sino que también puede eyacular dentro de la hembra, lo que facilita el transporte de los espermatozoides hacia el sitio de la fertilización después de hacer la IA.

Inseminación artificial a tiempo fijo (IATF)

Esta tecnología busca incrementar los índices de preñez en el hato y está basada en la IA, suprime la detección del estro, ya que la IA es realizada en un momento determinado [9][51]. Con los diferentes protocolos de IATF se logra sincronizar la fase lútea, el crecimiento folicular y la ovulación por medio del suministro de fármacos; cabe destacar que esta tecnología permite incluir a las hembras en anestro post parto y en ausencia o en manifestación del estro [32] [52].

Dentro de los protocolos de sincronización se utiliza la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) y las prostaglandinas ($PGF_{2\alpha}$) en días específicos [48] [53] (figura 1). Cabe señalar que para lograr resultados positivos en búfalas es necesario realizarlo en la estación reproductiva favorable debida a su estacionalidad [32]; no obstante, esto conlleva a problemas de abastecimiento de leche en el caso de tratarse de un hato de búfalas. Existen también protocolos de IATF basados en progestágenos y estradioles [54]47 (figura 2), estradioles y prostaglandina [55], o bien estradioles, prostaglandina y GnRH [56], así mismo son utilizados protocolos de resincronización, posterior a la confirmación negativa de la preñez [51] [56], en relación a esto Crudeli y colaboradores (2009) encontraron que se puede lograr una tasa de preñez mayor y significativa en el día 35 (68%) con respecto al Ovsynch (44%). En hembras bufalinas la combinación de las hormonas, GnRH, prostaglandina, gonotropina coriónica equina (eCG) y progestágenos, inducen a una mayor tasa de ovulación y de preñez, comparado a grupos donde se emplean las hormonas anteriores excluyendo eCG [58].



Figura 1. Protocolo de sincronización y resincronización Ovsynch para búfalas (Elaboración propia), basado en [54].



Figura 2. Protocolo de sincronización y resincronización utilizando progestágenos para búfalas.

Aspiración folicular, fertilización in vitro y transferencias de embriones

La producción *in vitro* de embriones se puede realizar en hembras maduras y bubillas con el fin de la recuperación in vivo de los oocitos [59]. Es importante realizar desinfección y lavado de la zona perineal y colocar una inyección epidural previo a la aspiración de los oocitos, ya que la extracción se realiza con una aguja conectada a una bomba de vacío guiada con un ultrasonido por medio de una sonda transvaginal convexa. Es trascendental lavar constantemente el sistema de aspirado con una solución establecida previamente para evitar contaminación [60]. Según Gamarra y colaboradores (2015) el 8% de las veces que se realizó el proceso de aspiración no se obtuvieron oocitos y que del total de los oocitos colectados 92% se clasificaron como viables, de los cuales agregan que es indiferente usar semen sexado o no.

Lo primero que se realiza es un aspirado de oocitos de los ovarios, sean estos del animal en pie [59] [61] o de ovarios colectados tras el sacrificio del animal [59] [62][63], los cuales son colocados en tubos de ensayo con un medio específico, clasificados según calidad A, B, C o D y trasladados al laboratorio [62]. Estos son transferidos a cajas Petri para su maduración y 20 horas después de la aspiración se fertilizan con el semen de preferencia [60] [63]. Las pajillas se descongelan a 37°C por 30 segundos se centrifuga y el pellet se resuspende en un medio específico y así obtener una concentración de 1,5 a 2 millones de espermatozoides/ml. En cada placa Petri con 20 oocitos se coloca una alícuota de 50 µl. Para obtener los cigotos se cultiva por 20-24 horas a 38,5°C, una atmósfera de 5% de CO₂ y 90% de humedad relativa [48] [60].

Los presuntos cigotos se trasladan a un nuevo medio de cultivo [61]. Se hace un cambio de medio 4 días después de la aspiración, ya que no es posible identificar la cantidad de blastómeros característicos de los oocitos de la especie; se hace un segundo cambio de medio a los 6-7 días post-aspiración, donde ya se observan los primeros blastocistos. Cuando alcanzan el crecimiento se congelan para una posterior transferencia directa [60]. Finalmente, los embriones se transfieren a hembras receptoras para ello las hembras se sincronizan con un protocolo de progesterona (P₄), PGF_{2a} y GnRH, luego se evalúa el cuerpo lúteo (CL) con ultrasonido y por último se transfieren al cuerno ipsilateral (en el mismo que tiene el CL) al quinto día posterior al momento en que se definió el estro [49].

La trasferencias de embriones in vivo es un proceso que da inicio con la colocación de hormonas en las hembras donadoras, las cuales presentan características heredables favorables para la producción animal, estas hormonas provocan la superovulación de la hembra, estos óvulos son fertilizados mediante la inseminación de la hembra y posteriormente colectados para ser transferidos a una hembra receptora, la cual se ocupará de llevar el feto a término y que amamantará a la cría hasta su destete [64]. Por otro lado, es importante señalar que se encuentra en estados iniciales los estudios sobre la reproducción bufalina por medio de la clonación [63].

La información expuesta en esta sección fue compilada de otros países latinoamericanos, Costa Rica podría tecnificar la actividad por medio de estas tecnologías y con ello generar información de su empleo en las condiciones específicas del país, para así ponerla a disposición de los productores actuales como de los potenciales.

Conclusiones

La especie bufalina aporta a nivel mundial productos cárnicos y lácteos, la bufalocultura ofrece ventajas competitivas a nivel productivo y de crecimiento de la economía, siendo el manejo reproductivo de importancia para la optimización de la producción, debe ampliarse el estudio y producción en hatos bufalinos como opción al cambio climático y combate de la pobreza. La presente investigación literaria realiza aportes al campo de estudio de la reproducción animal,

primeramente por desarrollar el tema de hatos bufalinos en condiciones tropicales, tópico escasamente abordado y registrado por los investigadores costarricense. Posteriormente el presente documento, incluye tanto información sobre manejo de la hembra y macho bufalino en un solo texto, reflejando la integralidad que representa el manejo de estos dos componentes para el equilibrio en la reproducción y con ello en la productividad. Adicionalmente, el registro de las biotecnologías reproductivas tradicionales, actuales y emergentes, brinda información valiosa al lector, sobre la introducción de estas biotecnologías en los hatos bufalinos costarricenses, las ventajas, requerimientos y funcionamiento de las mismas.

Referencias

- [1] A. Borghese y M. Mazzi, "Buffalo population and strategies in the world," en Buffalo production and research, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.
- [2] W. G. Vale, "Effects of environment on buffalo reproduction," *Ital. J. Anim. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 130-142, ene. 2007, doi: 10.4081/ijas.2007.s2.130.
- [3] R. Rosales, "Situación del búfalo de agua en Costa Rica," *Tecnol. Marcha*, vol. 24, no. 5, pp. 19-24, nov. 2011.
- [4] A. Aggarwal y R. Upadhyay, "Heat Stress and Reproduction, Heat Stress and Animal Productivity". Springer: India, 2013.
- [5] R. R. Rosales Rodríguez y R. WingChing-Jones, "Sistemas de producción bufalinos en Costa Rica. I. Cuantificación de la población y caracterización de los sistemas," *Agron. Costarric.*, vol. 31, no. 2, pp. 65-69, abr. 2007.
- [6] F. Napolitano, P. Corrado, F. Grasso, A. Braghieri, y G. Rosa, "The behaviour and welfare of buffaloes (*Bubalus bubalis*) in modern dairy enterprises," *Animal*, vol. 7, no. 10, pp. 1704-1713, oct. 2013.
- [7] A. S. Nanda, P. S. Brar, y S. Prabhakar, "Enhancing reproductive performance in dairy buffalo: major constraints and achievements," *Reprod. Suppl.*, vol. 61, pp. 27-36, 2003.
- [8] J. A. Sánchez, M. H. Romero y Y. J. Suárez-Vela, "Estacionalidad Reproductiva de la Hembra Bufalina (*Bubalus bubalis*)," *Rev Inv Vet Perú*, vol. 3, no. 28, pp. 606-618, jul. 2017.
- [9] J. Motta-Giraldo, I. Waktero-García, M. Abeledo-García, I. Miranda y R. Campos-Pipaon, "Principales trastornos reproductivos en búfalas y vacas en hatos mixtos y de una especie en el departamento de Caquetá, Colombia," *Rev. Med. Vet. Zoot.*, vol. 61, no. 3, pp. 228-240, set.-dic. 2014.
- [10] R. Rodrigues, E. M. Moreira, J. E. Ferreira, R. C. Soares Reis y M. R. Bourg, "Biotécnicas da reprodução aplicada aos bubalinos (*Bubalus Bubalis*)," *PUBVET*, vol. 12, no. 10, pp. 1-16, oct. 2018.
- [11] Y. Almaguer Pérez, "El búfalo, una opción de ganadería," *REDVET*, vol. 8, no. 8, pp. 1-23, ago. 2007.
- [12] J. Marques, N. Zoccal, y M. Figueiró, "Manejo reproductivo de búfalos con o uso de biotécnicas da reprodução," *Embrapa Amaz. Orient.*, vol. 3, pp. 443-472, may. 2019.
- [13] Z. Jara, "Salud de hato: definición y estrategias para el establecimiento de programas de medicina veterinaria preventiva," *Rev. la Fac. Med. Vet. y Zootec.*, vol. 56, no. 3, pp. 147-167, nov. 2009.
- [14] A. Calderón, V. Tique, C. Ensuncho, y V. Rodríguez, "Seroprevalencia de *Brucella abortus* en búfalos de agua (*Bubalus bubalis*) en el municipio de Lorica, Córdoba," *MVZ, M.Sc. Univ. Córdoba, Fac. Med. Vet. y Zootec. Inst. Investig. Biológicas del Trópico. Sede Berástegui*, vol. 13, no. 2, pp. 125-132, dic. 2010.
- [15] D.M. Bulla-Castañeda, D.J. García-Corredor y M.O. Pulido-Medellín, "Leucosis Enzootica Bovina, Revisión sistemática de literatura". *Rev. Pensamiento y Acción*, vol. 25, pp. 7-18, jul-dic. 2019
- [16] Á. J. Aguilar Setién, "El virus de la rinotraqueítis infecciosa bovina," *Cienc. Vet.*, vol. 4, pp. 123-134, 2007.
- [17] R.A. Jacobo, M.F. Cipolini, D.E. Martínez, M. Dellamea y M.G. Draghi, "Identificación de serovares de *Leptospira* sp. en búfalos de Corrienes, Argentina," *Red.vet.*, vol. 34, no. 2, pp. 126-227, 2009.
- [18] G. A. Bavera, "Razas de bovinas y búfalos de la Argentina," Iberti-Ibara: Argentina, 2011.
- [19] G. Crudeli, "Fisiología reproductiva de la búfala," *Rev. Vet. Argentina*, vol. 24, no.5 pp. 94-81, nov. 2011.
- [20] R.G.A. Pereira, Townsend, C.R. Costa, N.L., "Eficiência reproductiva de búfalos", Embrapa: Embrapa Rondônia, 2007.
- [21] O. M. Ohashi, M. dos S. Miranda, M. da S. Cordeiro, y S. do S. D. Santos, "Desenvolvimento reproductivo do macho bubalino: circunferência escrotal, atividade espermática e endocrinologia," *Rev. Bras. Reprodução Anim.*, vol. 31, no. 3, pp. 299-306, set. 2007.

- [22] W. Vale, "Avances biotecnológicos en reproducción de búfalo," *Tecnología en Marcha.*, vol. 24, no. 5 pp. 89-104 2011.
- [23] S. A. Canizales, U. Zulia, y F. D. C. Veterinarias, "Características seminales del Búfalo de agua (*Bubalus bubalis*)," *Rev. Colomb. Cienc. Anim., RECIA*, vol. 4, no. 1, pp. 95-102, 2011.
- [24] S. Singh, "Semen Production in Buffalo Bulls," *Buffalo Bull.*, vol. 32, no. 1, pp. 277-284, 2013.
- [25] S. S. Paul, "Nutrient requirements of buffaloes," *Rev. Bras. Zootec.*, vol. 40, pp. 93-97, enero 2011.
- [26] A. Singh, S. Rajak, P. Kumar, S. Kerketta, y R. Yogi, "Nutrition and bull fertility: A review," *J. Entomol. Zool. Stud.*, vol. 6, no. 6, pp. 635-643, 2018.
- [27] M. El-Sharawy, E. Eid, S. Darwish, I. Abdel-Razek, M. R. Islam, K. Kubota, N. Yamauchi, y I. El-Shamaa, "Effect of organic and inorganic selenium supplementation on semen quality and blood enzymes in buffalo bulls," *Anim. Sci. J.*, vol. 88, no. 7, pp. 999-1005, jul. 2017, doi: 10.1111/asj.12736.
- [28] M. Eghbali, S. M. Alavi-Shoushtari, S. Asri-Rezaei, y M.-H. Khadem Ansari, "Calcium, Magnesium and Total Antioxidant Capacity (TAC) in Seminal Plasma of Water Buffalo (*Bubalus bubalis*) Bulls and their Relationships with Semen Characteristics," *Vet. Res. Forum.*, vol. 1, no 1, pp. 12-20, jun. 2010.
- [29] P. Singh, B. P. Sengupta, y V. N. Tripathi, "Effect of supplemental amino acid feeding on sexual behaviour, quality and freezability of buffalo bull semen," *J. Buffalo Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 41-46, ene. 2000.
- [30] A. Espitia, D. Montes Vergara, E. Hernández, y H. Sfeir B, "Circunferencia escrotal y parámetros morfométricos en machos *Bubalus bubalis* de la raza Murrah," *Rev. Colomb. Cienc. Anim. RECIA*, vol. 9, no. 1, pp. 73, jun. 2017.
- [31] J. A. Sánchez, M. H. Romero y A. F. Meneses, "Dinámica folicular durante el ciclo estral natural en búfalas (*Bubalus bubalis*)," *Rev. investig. vet. Perú.*, vol. 30, no. 1, mar. 2019.
- [32] W. Vale, "Reproducción en hembras bufalinas: inseminación artificial y reproducción asistida," *Tecnol. Marcha*, vol. 24, no. 5, pp. 5-18, nov. 2011.
- [33] N. Montiel-Urdaneta, "Algunos aspectos reproductivos e inseminación artificial en búfalas," en X Seminario de Pastos y Forrajes, Maracaibo, 2006, pp. 174-186.
- [34] J. Motta-Giraldo, I. Waltero-García y M. Abeledo, "Prevalencia de anticuerpos al virus de la diarrea viral bovina, Herpesvirus bovino 1 y Herpesvirus bovino 4 en bovinos y búfalos en el Departamento de Caquetá, Colombia," *Rev. Salud Anim.*, vol. 35, no. 3, pp. 174-181, dic. 2013.
- [35] F. Napolitano, P. Corrado, F. Grasso, A. Braghieri, y G. Rosa, "The behaviour and welfare of buffaloes (*Bubalus bubalis*) in modern dairy enterprises," *Ital. J. Anim. Sci.*, vol. 7, no. 10, pp. 1704-1713, oct. 2013.
- [36] M. S. Qureshi, "Nutritional and Management Support to Reproduction in Dairy Buffaloes Under Tropical Conditions," *Pak. J Zool Suppl Ser*, no. 9, pp. 895-909, ene. 2009.
- [37] M. Sarwar, M. A. Khan, M. Nisa, S. A. Bhatti, y M. S. Shahzad, "Nutritional Management for Buffalo Production," *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, vol. 22, no. 7, pp. 1060-1068, jul. 2009.
- [38] S. Terramoccia, S. Bartocci, y A. Borghese, "Nutritional requirements in buffalo cows and heifers," en Buffalo production and research, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005, pp. 145-160.
- [39] T. Bülbül, "Energy and Nutrient Requirements of Buffaloes," *Kocatepe Vet. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 55-64, 2010.
- [40] M. S. Qureshi, G. Habib, H. A. Samad, M. M. Siddiqui, N. Ahmad, y M. Syed, "Reproduction-Nutrition Relationship in Dairy Buffaloes. I. Effect of Intake of Protein, Energy and Blood Metabolites Levels," *Asian Australas. J. Anim. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 330-339, 2002, doi: 10.5713/ajas.2002.330
- [41] A. J. Mendes y C. de Lima-Francisco, "Aspectos nutricionales del búfalo," *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 24, no. 5, pp. 105-120, nov. 2011.
- [42] B. S. Punia y S. Singh, "Buffalo calf feeding and management," *Buffalo Bull.*, vol. 20, no. 1, pp. 3-11, 2001.
- [43] A. Valverde y M. Madrigal-Valverde, "Sistemas de análisis computadorizado de semen en la reproducción animal," *Agron. Mesoam.*, vol. 29, no. 2, pp. 469-484, ago. 2018, doi: doi:10.15517/ma.v29i2.30613.
- [44] S. E. Canizales, "Características seminales del Búfalo de agua (*Bubalus bubalis*)," *RECIA*, vol. 4, no. 1, pp. 95-102, 2011.
- [45] S. Akhter, M.S. Ansari, B.A. Rakha, S.M.H. Andrabi, M. Khalid, y N. Ullah, "Effect of low lipoprotein and fertility of buffalo (*Bubalus bubalis*) bull semen," *Theriogenology*, vol. 76, no. 4, pp. 759-764, set. 2011.
- [46] S. Akhter, M.S. Ansari, B.A. Rakha, S.M.H. Andrabi, S. Iqbal, N. Ullah, "Cryopreservation of buffalo (*Bubalus bubalis*) semen in Bioxcell R extender," *Theriogenology*, vol. 74, no. 6, pp. 951-955, jun. 2010.

- [47] Colegio Brasileiro de Reproducao Animal (CBRA), "Manual para examen andrológico e avaliacao de semen animal," 3ed. CBRA, Belo Horizonte, p. 46, 2013.
- [48] A. Gaviraghi, R. Puglisi, D. Balduzzi, A. Severgnini, V. Bornaghi, A. Frana, L.M. Gandini, A. Lukaj, C. Bonacina, A. Galli, "Minimum number of spermatozoa per dose in Mediterranean Italian buffalo (*Bubalus bubalis*) using sexed frozen semen and conventional artificial insemination," *Theriogenology*, vol. 79, no. 8, pp. 1171-1176, mar. 2013.
- [49] J. A. Berdugo, "Historia de la aplicación de biotecnologías reproductivas en la cría del búfalo en Colombia," *Uni-pluri/versidad*, vol. 12, no.3, pp. 87-91, abr. 2013.
- [50] G. Campanile, B. Gasparrini, D. Vecchio, G. Neglia, E. M. Senatore, A. Bella, G. A. Presicce, L. Zicarelli, "Pregnancy rates following AI with sexed in Mediterranean Italian buffalo heifers (*Bubalus bubalis*)," *Theriogenology*, vol. 76, no. 3, pp. 500-506, abr. 2011.
- [51] G. Neglia, M. Capuano, A. Balestrieri, R. Cimmino, F. Iannaccone, F. Palumbo, G.A. Presicce, y G. Campanile, "Effect of consecutive re-synchronization protocols on pregnancy rate in buffalo (*Bubalus bubalis*) heifers out of the breeding season," *Theriogenology*, vol. 113, pp. 120-126, feb. 2018.
- [52] G. A. Crudeli, R. L. De La Sota, R. E. Scarnatto, J. L. Konrad, y E. M. Patiño, "Tasa de preñez en búfalas sometidas a distintos protocolos de inseminación artificial a tiempo fijo en el nordeste argentino," *Rev. Med. Vet. Zoot*, vol. 20, no. 1, pp. 41-44, jul. 2009.
- [53] B.D.S. Nahúm, N.Z. Soraiva, C. Faturi, A.G. M.E. Silva, J.D.B. Lourenco Junior, J.S.D. Souza, J.M.D. Amaral Junior, G.D.P. Nogueira, y G.Z. Mingoti, "Effect of dietary supplementation of palm kernel cake on ovarian and hepatic function in buffalo (*Bubalus bubalis*)," *Anim. Reprod. Sci.*, vol. 204, pp. 76-85, may. 2019.
- [54] F. Gamarra, V. Rendón, A. Chávez, L. Perez, W. Cardona, y J. Berdugo, "Establishing an in-vitro production program for buffalo embryos (*Bubalus bubalis*) in Colombia," *Rev. MVZ Córdoba*, vol. 20, no. 1, pp. 4495-4504, ene. 2015.
- [55] M. Honparkhe, V.K. Gandotra, J.S. Matharoo, S.P.S. Ghuman, D. Dadarwal, y J. Singh, "Synchronization of follicular wave emergence following ultrasound-guided transvaginal follicle ablation or estradiol-17B administration in water buffalo (*Bubalus bubalis*)," *Anim. Reprod. Sci.*, vol. 146, pp. 5-14, abr. 2014.
- [56] R. Mirmahmoundi, M. Soury, y B.S. Prakash, "Endocrine changes, timing of ovulation, ovarian follicular growth and efficacy of a novel protocol (Estradodoublesynch) for synchronization of ovulation and timed artificial insemination in Murrah buffaloes (*Bubalus bubalis*)," *Theriogenology*, vol. 82, no. 7, pp. 237-242, oct. 2014.
- [57] U. Arshad, A. Qayyum, M. Hassan, A. Husnain, A. Sattar, N. Ahmad, "Effect of resynchronization with GnRH or progesterone (P4) intravaginal device (CIDR) on Day 23 after timed artificial insemination on cumulative pregnancy and embryonic losses in CIDR-GnRH synchronized Nili-Ravi buffaloes," *theriogenology*, vol. 103, pp. 104-109, nov. 2017.
- [58] K. Murugavel, D. Antoine, M. S. Ragu, y F. López-Gatius, "The Effect of addition of equine chorionic gonadotropin to a progesterone-based estrous synchronization protocolo in buffalo es (*Bubalus bubalis*) under tropical conditions," *Theriogenology*, vol. 71, no. 7, pp. 1120-1126, abr. 2009.
- [59] J. G. S. D. Carvalho, N. A. T. D. Carvalho, B. M. Bayeux, Y. F. Watanabe, O. Y. Watanabe, R. D. Mingoti, y P. S. Baruselli, "Superstimulation prior to the ovum pick-up improves the in vitro embryo production in nulliparous, primiparous and multiparous buffalo (*Bubalus bubalis*) donors," *Theriogenology*, vol. 138, pp. 164-168, oct. 2019.
- [60] M. D. Quintana, P. Herrera, B. Ramos, y F. Agüero, "Biotecnología reproductiva aplicada a la mejora genética de *Bubalus bubalis* en Cuba," *Rev. Salud Anim.*, vol. 40, no. 3, pp. 1-5, dic. 2018.
- [61] L. U. Gimenes, M. L. Ferraz, P. Fantinato-Neto, M. R. Chiaratti, L. G. Mesquita, M. F. Sá Filho, F. V. Meirelles, L. A. Trinca, F. P. Rennó, Y. F. Watanabe, y P. S. Baruselli, "The interval between the emergence of pharmacologically synchronized ovarian follicular waves and ovum pickup does not significantly affect embryo production in *Bos indicus*, *Bos Taurus*, and *Bubalus bubalis*," *Theriogenology*, vol. 83, no. 3, pp. 385-393, feb. 2015.
- [62] S. Kumar, S.K. Singla, R. Manik, P. Palta, y M.S. Chauhan, "Effect of basic fibroblast growth factor FGF2) on cumulus cell expansion, in vitro embryo production and gene expression in buffalo (*Bubalus bubalis*)," *Reprod. Biol.*, vol. 20, no. 4, pp. 501-511, dic. 2020.
- [63] S. Shyam, P. Goel, D. Kumar, S. Malpotra, M. K. Singh, S. S. Lathwal, S. Chand, y P. Palta, "Effect of Dickkopf-1 and Colón y stimulating factor-2 on the developmental competente, quality, gene expression and live birth rate of buffalo (*Bubalus bubalis*) embryo produce by hand-made cloning," *Theriogenology*, vol. 157, pp. 254-262, nov. 2020.
- [64] P.S. Baruselli, J.G.S.D. Carvalho, F.M. Elliff, J.C.B.D. Silva, D. Chello, y N.A.T.D. Carvalho, "Embryo Transfer in buffalo (*Bubalus bubalis*)," *Theriogenology*, vol. 150, pp. 221-228, jul. 2020.

Perfilado de rendimiento de FPS para múltiples arquitecturas computacionales usando el algoritmo de reducción de neblina DCP

FPS performance profiling for multiple computational architectures using the DCP dehazing algorithm

Allan Francisco Navarro-Brenes¹, Luis Alberto Chavarría-Zamora²

*Fecha de recepción: 30 de abril de 2021
Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2021*

Navarro-Brenes, A.F; Chavarría-Zamora, L.A. Perfilado de rendimiento de FPS para múltiples arquitecturas computacionales usando el algoritmo de reducción de neblina DCP. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 73-81.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5718>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: allannabre01@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4878-7223>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: lachavarria@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2510-5680>

Palabras clave

Benchmark de FPS; procesamiento de imágenes; procesamiento en tiempo real; sistemas empotrados; arquitectura de computadores; reducción de neblina; restauración de imagen.

Resumen

Este documento presenta una prueba de rendimiento creada para evaluar el desempeño de diferentes plataformas en la ejecución de un algoritmo de reducción de niebla basado en el “Dark Channel Prior” (DCP) [1]. El parámetro utilizado para la evaluación fue el número de cuadros por segundo (FPS, por sus siglas en inglés) que el dispositivo es capaz de procesar. Con esta herramienta se logra determinar aquellas arquitecturas que son aptas para ejecutar el algoritmo en tiempo real.

El ambiente de pruebas se ejecutó en cuatro plataformas, un Google Pixel 3a, una Raspberry Pi 3B+, una GPU de NVIDIA y un procesador Intel x86. Se usaron los siguientes kits de desarrollo de software (SDK, por sus siglas en inglés) según la plataforma: Android NDK, Yocto Poky, CUDA y la cadena de herramientas GCC.

La herramienta permitió recopilar, para cada plataforma, los FPS para distintos tamaños de imagen, con estos resultados se pueden escoger la arquitectura más idónea según el área de implementación (e.g., bajo consumo o HPC).

Keywords

FPS benchmark; image processing; real-time processing; embedded systems; computer architecture; image dehazing; image restoration.

Abstract

In this document we present a benchmark to evaluate the performance of different platforms in the execution of a dehazing algorithm based on the Dark Channel Prior (DCP) [1]. The parameter used for the evaluation was the number of frames per second (FPS) that the device was able to process. This tool allows to determine which architectures can execute the algorithm in real time.

The testing environment was executing in four platforms, a Google Pixel 3a, a Raspberry Pi 3B+, a GPU by NVIDIA, and an Intel x86 processor. The following software development kits (SDK's) where used for each of the platforms: Android NDK, Yocto Poky, CUDA, and the GCC toolchain.

The tool allowed us to collect, for each platform, the FPS for different image sizes, these results allow the selection of an ideal architecture depending on a specific application (e.g., low power, HPC).

Introducción

La niebla ha tenido un impacto significativo en actividades de la humanidad desde las edades tempranas y especialmente en las últimas décadas como consecuencia del aumento de la circulación aérea, marina, y el tráfico terrestre [2]. Las consecuencias de este fenómeno han generado pérdidas económicas y humanas comparables con los efectos de otros eventos meteorológicos como tornados o huracanes [2].

Un ejemplo de este impacto se refleja en las cifras de accidentes relacionados con la niebla, como lo indica la Administración Federal de Carreteras (FHWA) de EE. UU, la niebla causó el 2% de las muertes en accidentes automovilísticos entre 2007 y 2016. Además, del total de

muerres relacionadas con el clima, un 9% se debió a este fenómeno [3]. El tener un sistema informático que ayude a reducir los efectos negativos de la niebla en imágenes digitales puede ser beneficioso en el sector transporte con posibles aplicaciones en otras áreas como: sistemas de seguridad, industria fotográfica y cinematográfica.

Para implementar este sistema, se debe realizar un análisis previo de las plataformas candidatas en función de su capacidad para implementar un algoritmo de reducción de niebla en tiempo real. En este documento se proporciona una forma sistemática de evaluar diferentes plataformas y recopilar los datos generados durante tiempo de ejecución con el fin de encontrar la plataforma idónea según el área de aplicación. Adicionalmente, se desarrolla una herramienta compilable para diferentes plataformas dado un mismo código fuente capaz de transmitir datos en tiempo real a una computadora para visualizar los resultados.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en el marco teórico se presentan los conceptos fundamentales del algoritmo DCP y otros trabajos similares al desarrollado. En la sección “Materiales y Métodos”, se explica la metodología empleada para desarrollar la herramienta y el diseño utilizado. En la sección de resultados, se muestra la información captada por las distintas plataformas y por último se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Marco teórico

Algoritmo DCP

El algoritmo utilizado para realizar el procesamiento de las imágenes es el “*Dark Channel Prior*” (DCP) [1] [4]. Este algoritmo se basa en la premisa que, para imágenes de exteriores sin niebla, al menos un canal de color tiene algunos píxeles cuya intensidad es cercana a cero para cuadros que no contengan cielo [4]. El modelo de formación de niebla utilizado en ese trabajo es el descrito por la ecuación (1).

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{J}(x)t(x) + \mathbf{A}(1 - t(x)) \quad (1)$$

donde $\mathbf{I}(x)$ es la intensidad de la imagen de entrada, $\mathbf{J}(x)$ es la luminosidad de la escena, \mathbf{A} es la luz atmosférica global y $t(x)$ es la transmisividad del medio, este modelo resulta en un sistema de ecuaciones indeterminado, con $3N$ variables conocidas y $4N + 3$ incógnitas [4]. Para lograr resolver el sistema, a partir de una imagen arbitraria \mathbf{Y} , se determina su canal oscuro (DCP) o J^{dark} como se muestra en [4].

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(\mathbf{Y}) \right) \quad (2)$$

Donde J^{dark} es una imagen en escala de grises, se escoge el 0.1% de píxeles con mayor intensidad. Utilizando la posición de los píxeles seleccionados, se selecciona el color que tenga la mayor intensidad en la imagen original, este color corresponde a \mathbf{A} . Luego se calcula una aproximación de $t(x)$ llamada $\tilde{t}(x)$, de la siguiente manera:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (3)$$

Este cálculo es en realidad el DCP de I normalizado por A , como se menciona en [4]. Para reconstruir la imagen deseada J , se utiliza la siguiente fórmula:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (4)$$

Múltiples métodos propuestos para reducir niebla en imágenes son en realidad variaciones u optimizaciones del DCP (por ejemplo [1], [4]). Además, existen trabajos para aplicaciones agrícolas en imágenes aéreas, donde el DCP muestra una mejora de calidad en imágenes para fotogrametría utilizando un brillo modificado en los espacios HSB y HSL antes de la aplicación del algoritmo DCP [5].

Una revisión extensiva de distintos métodos de procesamiento menciona al DCP como el concepto preferido por los investigadores según [6]. Como este algoritmo es usado extensivamente en múltiples trabajos de estudio de neblina, se propone el estudio de múltiples plataformas ejecutando el DCP.

Trabajos relacionados

Hay varios trabajos relacionados con la reducción de neblina de imágenes en sistemas empotrados de tiempo real. Por ejemplo, en [7] se muestra un dispositivo integrado de bajo costo para reducción de neblina en imágenes [7]. Otro algoritmo propuesto basado en DCP se discute en [8] donde se usa una imagen de entrada reducida para calcular J^{dark} y, utilizando un tamaño de ventana de un píxel, lo cual permite reducir en gran medida el tiempo de ejecución del algoritmo sin cambios significativos en la calidad en los resultados.

En cuanto a pruebas de desempeño (*benchmarks*), en [9] se evalúan diferentes algoritmos, mencionando al DCP como uno de los métodos que mejores resultados lograron en un ambiente submarino. En [10] se realizó un *benchmark* para dos plataformas embebidas diferentes, el cual tiene similitudes con los objetivos de este estudio. Sin embargo, este *benchmark* se enfocan en arquitecturas especializadas mientras que la intención detrás de este trabajo es tratar con una amplia gama de plataformas, analizando más dispositivos y produciendo una prueba que se puede ejecutar sin cambios significativos en el código fuente, al proveer una funcionalidad para incluir otras arquitecturas no contempladas en este trabajo.

Materiales y métodos (metodología)

En esta sección, se explica la metodología desarrollada en el trabajo propuesto. Primero, se inició con la selección de las plataformas a comparar, se escogieron cuatro plataformas, las cuales son mostradas en el cuadro 1. Además, la herramienta puede ser compilada para cualquier otra plataforma, agregado a la pantalla de visualización siempre y cuando cumpla con el formato definido.

Cuadro 1. Plataformas utilizadas para analizar el desempeño de el algoritmo DCP.

Plataforma	Núcleos de procesamiento	RAM	Sistema Operativo
Broadcom BCM2837B0 (Raspberry Pi 3B+)	4 núcleos Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit @ 1.4GHz	1GB LPDDR2	Yocto Poky 3.1
Snapdragon 670 (Google Pixel 3a smartphone)	8 núcleos 2@2.0 GHz 360 Gold y 6@1.7 GHz Kryo 360 Silver	4GB LPDDR4x	Android 11
GeForce GTX 1050 Ti ³	768 núcleos CUDA	4GB GDDR5	Ubuntu 20.04
Intel Core i7-8750H	6 núcleos (12 hilos) x86 64-bit @ 2.2 GHz	32GB DDR4	Ubuntu 20.04

Diseño y herramientas utilizadas

La figura 1 muestra, en alto nivel, la arquitectura utilizada para la herramienta, donde se tienen múltiples nodos los cuales se comunican mediante el protocolo de control de transmisión (TCP) con la máquina del usuario, la cual es la que almacena la información y muestra los gráficos en pantalla.

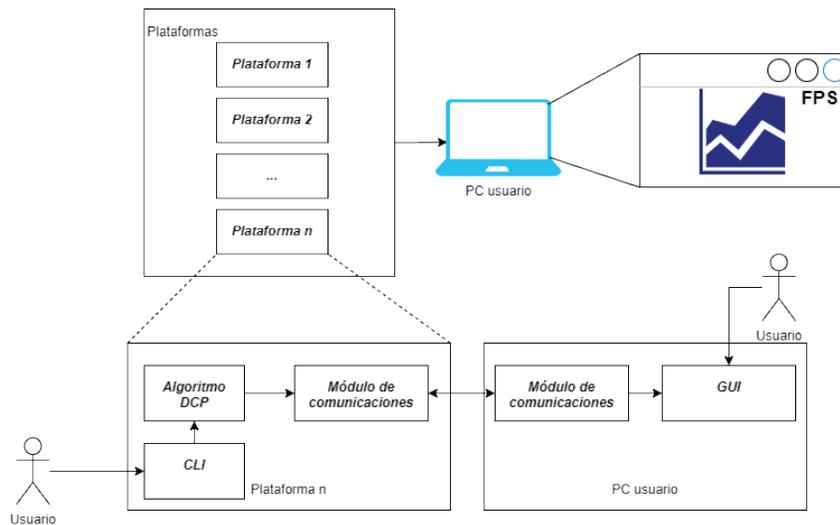


Figura 1. Arquitectura de alto nivel de la herramienta propuesta en este trabajo.

Las principales tecnologías y herramientas utilizadas en este documento para desarrollar el sistema fueron las siguientes:

- Lenguaje de programación: Se utilizó C++ tanto para el *backend* como para la interfaz gráfica.
- Compilador: GCC 9.3.0.
- Interfaz de usuario: Qt 5, para la visualización de los datos.

- Programación multi hilo: Para las plataformas que no utilizan GPU, se utilizó Open MP versión 4.3, la cual forma parte del compilador GCC.
- Programación con GPU: CUDA 11.1, esta herramienta provee una interfaz sencilla para ejecutar programas en entornos heterogéneos (GPU+CPU).
- Procesamiento de Imágenes: OpenCV 4.4, para simplificar la codificación y decodificación, así como manipulación básica de imágenes.
- Protocolo de comunicación: Se utilizó TCP/IP mediante “sockets” de Linux para recopilar la información procedente de las plataformas y centralizarla en la computadora del usuario.

Resultados

La figura 2 muestra una ventana de la herramienta con los resultados de la ejecución en las cuatro plataformas consideradas procesando una imagen con una resolución QHD (960x540 píxeles). Todas las plataformas lograron procesar a esta resolución a una tasa de al menos 20 FPS, a esta velocidad aún se puede visualizar un video de manera fluida.



Figura 2. Ejecución de la herramienta con cuatro plataformas procesando una imagen en QHD (resolución) con el algoritmo DCP.

La interfaz gráfica es capaz de agregar dinámicamente las plataformas deseadas para ocupar menos espacio de ventana como se muestra en la figura 3. En esta imagen se observa como para una GPU CUDA se obtiene un rendimiento de 20.3919 FPS procesando una imagen UHD.



Figura 3. GPU ejecutando el algoritmo DCP para una imagen UHD.

En la figura 4 se muestra el procesamiento del algoritmo DCP para reducir la neblina. Hacia la izquierda de la imagen se observan las entradas, a la derecha, se muestra la misma imagen procesada por las plataformas.



Figura 4. Imágenes procesadas por las plataformas. Imagen libre de derechos de autor tomada de pexels.com.

Por otra parte, en la figura 5. Muestra de fotogramas de uno de los videos procesados. Video libre de derechos de autor tomado de pexels.com. figura 5, se muestra un extracto de tres fotogramas de uno de los videos procesados por la herramienta.



Figura 5. Muestra de fotogramas de uno de los videos procesados. Video libre de derechos de autor tomado de pexels.com.

Conclusiones y recomendaciones

En este artículo se presentó una manera sistemática de analizar el comportamiento de distintas plataformas en la ejecución del algoritmo DCP, teniéndose que el tamaño máximo de imagen procesado en el ambiente de pruebas fue 4k (UHD), el cual pudo ser procesado por la GPU a una velocidad promedio de aproximadamente 20 FPS, mientras que la Raspberry Pi 3B+ pudo manejar un video QHD a esa misma velocidad.

Como se observa en la figura 2, las plataformas Snapdragon e Intel tuvieron un desempeño similar en la ejecución del algoritmo. Es importante recalcar que la segunda es la PC del usuario en la cual se ejecuta la GUI junto con otros procesos no relacionados directamente con el algoritmo DCP. Es por esto por lo que se considera que el rendimiento de la plataforma debería aumentar si se ejecuta en un entorno mínimo.

La figura 3. muestra los resultados de CUDA para el video de mayor resolución considerado con un tamaño de con una resolución UHD, a una tasa de aproximadamente 20 FPS, lo cual se puede visualizar continuamente. El uso de una GPU para el paralelismo a nivel de datos demuestra ser el método de mejor rendimiento en comparación con el uso de programación multihilo en la CPU, esto es de esperar debido a que el algoritmo DCP es altamente paralelizable, además, la plataforma CUDA utilizada cuenta con 768 núcleos. Este método es aproximadamente tres veces más rápido que la siguiente mejor solución que usa solo los 12 núcleos de la CPU x86 en la misma máquina.

La prueba de rendimiento permite la evaluación de múltiples plataformas ejecutando el algoritmo de depuración DCP utilizando un único código fuente. Además, se demostró la viabilidad de utilizar un sistema empotrado de pocos recursos como la Raspberry Pi con una resolución media de 960x540 píxeles logrando un rendimiento de hasta 20 FPS. Una GPU en un entorno heterogéneo es capaz de procesar calidades mucho más altas de hasta 4k conservando una buena velocidad de fotogramas.

Esta herramienta permite contar con información en tiempo real acerca de la ejecución del algoritmo DCP en distintas plataformas, con estos datos es posible escoger de una manera objetiva la plataforma adecuada dependiendo la aplicación objetivo, explorando potenciales soluciones a un reto ingenieril.

Se recomienda analizar el comportamiento del procesador x86 utilizando otro equipo distinto al que se usa para ejecutar el *benchmark*. Preferiblemente en un entorno mínimo mediante el uso de un sistema operativo personalizado como lo es Yocto. Con esto se evita que se impacte negativamente el desempeño del algoritmo DCP.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al PhD. Juan Pablo Soto Quirós, por la retroalimentación brindada.

Referencias

- [1] K. He, J. Sun y X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," in 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009, pp. 1956–1963. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206515.
- [2] I. Gultepe, R. Tardif, S. C. Michaelides, J. Cermak, A. Bott, J. Bendix, M. D. Müller, M. Pagowski, B. Hansen, B. Ellrod, W. Jacobs, G. Toth y S. G. Cober, "Fog research: A review of past achievements and future perspectives," in Pure and Applied Geophysics, vol. 164, 2007, pp. 1121–1159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>.
- [3] How do weather events impact roads? [En línea]. Disponible: https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm.
- [4] K. He, J. Sun y X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353, 2011. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168.
- [5] L. A. Chavarria-Zamora, S. Arriola-Valverde y R. Rimolo-Donadio, "Evaluation of fog reduction algorithms for photogrammetric applications in agriculture," in 2018 IEEE International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWobi), 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1109/IWobi.2018.8464186.
- [6] G. Harish Babu and N. Venkatram, "A survey on analysis and implementation of state-of-the-art haze removal techniques," Journal of Visual Communication and Image Representation, vol. 72, p. 102 912, 2020, ISSN: 1047-3203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2020.102912>. [En línea]. Disponible: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1047320320301504>.
- [7] T. Koga, A. Yasuda, S. Furukawa y N. Suetake, "A simplified and fast dehazing processing suitable for embedded systems," in 2018 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2018, pp. 492–497. DOI: 10.1109/ISPACS.2018.8923385.
- [8] Y. Iwamoto, N. Hashimoto y Y. Chen, "Fast dark channel prior based haze removal from a single image," in 2018 14th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), 2018, pp. 458–461. DOI:10.1109/FSKD.2018.8686854.
- [9] J. Perez, P. J. Sanz, M. Bryson y S. B. Williams, "A benchmarking study on single image dehazing techniques for underwater autonomous vehicles," in OCEANS 2017 - Aberdeen, 2017, pp. 1–9.
- [10] P. Soma and R. K. Jatoth, "Implementation of a novel, fast and efficient image de hazing algorithm on embedded hardware platforms," Circuits, Systems, and Signal Processing, Aug. 2020. DOI: 10.1007 / s00034-020-01517-4. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1007/s00034-020-01517-4>.

Variabilidad transversal de características dimensionales de traqueidas en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de plantaciones de 25 años de edad

Radial variability of quantitative features of tracheids in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* from 25 years old plantations

Gabrialy Márquez-Carrero.¹, Styles W. Valero², Williams J. León-Hernández³, Ilvania J. Gutiérrez-Gotera⁴, Julio C. Maldonado-Rangel⁵

Fecha de recepción: 16 de setiembre de 2021
Fecha de aprobación: 8 de noviembre de 2021

Márquez-Carrero, G; Valero, S.W; León-Hernández, W.J; Gutiérrez-Gotera, I.J; Maldonado-Rangel, J.C. Variabilidad transversal de características dimensionales de traqueidas en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de plantaciones de 25 años de edad. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 82-93.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5868>

- 1 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio de Anatomía de Maderas. Venezuela.
Correo electrónico: gabrialy@gmail.com
- 2 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Sección de Ensayos. Venezuela.
Correo electrónico: styles@ula.ve
- 3 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio de Anatomía de Maderas. Venezuela.
Correo electrónico: wleon@ula.ve
- 4 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio Nacional de Productos Forestales. Sección de Pulpa y Papel. Venezuela. Correo electrónico: ilgutie@ula.ve
- 5 Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Laboratorio de Anatomía de Maderas. Venezuela.
Correo electrónico: jmaldonado@ula.ve

Palabras clave

Longitud de traqueidas; madera adulta; madera juvenil; madera temprana; madera tardía.

Resumen

Se presenta el estudio de variabilidad de longitud, diámetro total, diámetro del lumen, espesor de pared y fracción de pared de las traqueidas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* proveniente de plantaciones de 25 años de edad establecidas en Uverito (estado Monagas, Venezuela). Se examinaron un total de seis individuos y se preparó tejido macerado en tres posiciones de la sección transversal: adyacencias de médula, punto medio (muestras en madera temprana y madera tardía) y adyacencias del cambium. Los resultados indican que el mayor diámetro promedio (total y del lumen) correspondió a la madera temprana, mientras que los mayores grosores y fracción de pared se concentraron hacia la madera tardía. En relación a la longitud de traqueidas aumenta desde la zona cercana a la médula hasta el punto medio de la sección transversal para, posteriormente, disminuir hacia las adyacencias del cambium y alcanzar valores muy similares a los del punto inicial. El patrón de variación de longitud de traqueidas indica que a partir del punto medio de la sección transversal comienza la formación de madera adulta.

Keywords

Tracheids length; adult wood; juvenile wood; early wood; late wood.

Abstract

This research is about variability of quantitative features (length, diameter, thickness, wall fraction) in tracheids of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* from 25 years old plantations from Uverito (Monagas state, Venezuela). Six trees were studied and macerated tissue were prepared in three positions in cross section: near of pith, middle point of cross section and near of cambium. Higher diameter was observed in early wood and in late wood were found higher thickness wall. Tracheid length had an increment from the pith to middle point and, then, showed a reduction from middle point to cambium. According variation in tracheids length, adult wood appears from the middle point to cambium.

Introducción

Uno de los elementos más importantes para la correcta utilización de la madera es el conocimiento de la misma. Su uso adecuado requiere de fases de transformación que permiten tener un material idóneo para la satisfacción de necesidades. Tanto el procesamiento como la utilización están en relación directa con las propiedades de la madera y las bondades que ofrece ésta variando de una especie a otra [1]. Las características anatómicas de la madera ejercen una gran influencia sobre las propiedades físico-mecánicas de la misma. Por ejemplo, el peso específico es considerado como uno de los mejores indicadores de la resistencia y los valores de las propiedades mecánicas en la madera [2]. Según [2] y [3], el peso específico depende de tres factores: tamaño de las células, el espesor de sus paredes y la interacción entre el número de células de diferentes tipos. Si se analizan cada uno de esos factores, se puede observar que corresponden a la estructura anatómica de la madera. En el caso de coníferas, [4] señala que la distinción de anillos de crecimiento está determinado por variaciones en el grosor y diámetro radial de paredes de traqueidas pudiendo presentarse una transición gradual o abrupta entre la zona de traqueidas de paredes delgadas y con mayor diámetro radial (madera temprana) y

la región con traqueidas de paredes gruesas y de menor diámetro radial (madera tardía). Esto indica que esas variaciones que permiten diferenciar anillos de crecimiento en este tipo de maderas deben traducirse en variaciones en la densidad y peso específico dentro de un anillo de crecimiento, por lo tanto, en variaciones de las diferentes propiedades físicas y mecánicas. Las características dimensionales de las traqueidas son un elemento de gran importancia para el uso óptimo de la madera: variaciones en grosor de paredes, diámetro del lumen o diámetro total de traqueidas tienen efecto directo sobre el peso específico, tasa de contracciones y las diferentes propiedades mecánicas. Con respecto a la longitud de traqueidas, su variación tiene efecto directo sobre algunos campos de utilización. Por ejemplo, en la industria de pulpa y papel se determinan una serie de índices morfológicos que permiten conocer la aptitud de una especie para ese tipo de producto y algunos de esos índices toman en consideración la longitud de las traqueidas. [5] señala que, en general, las células más largas dan resistencia al papel; aunque en ocasiones la resistencia a la tensión, que habitualmente es la propiedad más asociada con la mayor resistencia del papel, depende más bien del enlace entre las fibras que de la longitud de éstas, pero a su vez, el grado de entrecruzamiento de las células tiene relación directa con su longitud. Adicionalmente, las variaciones de longitud de traqueidas en sentido transversal son el elemento más confiable para delimitar las zonas de madera juvenil y madera adulta; elemento de gran importancia debido a las grandes diferencias de comportamiento tecnológico entre ambas zonas.

En Venezuela se disponen de grandes extensiones plantadas con *Pinus caribaea* las cuales se han venido estableciendo, con fines comerciales, desde 1969. En este sentido, el único estudio de variación de longitud de traqueidas y proporciones de madera juvenil y adulta es el presentado por [6], lo que indica la existencia de una gran vacía de información en ese sentido; esto se une a la falta de información en cuanto al patrón de variación de diámetros y grosor de paredes de traqueidas para esta especie en el país.

Tomando en cuenta esos aspectos, el objetivo del presente trabajo es la determinación del patrón de variación de la longitud, diámetros (total y lumen) y grosor de paredes de traqueidas en madera temprana y tardía de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari (Pinaceae) proveniente de plantaciones de 25 años en tres posiciones de la sección transversal: las adyacencias de la médula, punto medio del radio y a las adyacencias del cambium. La ubicación de muestras en tres posiciones también permitirá determinar el grado de variabilidad de las características dimensionales de las traqueidas en dirección radial.

Materiales y métodos

El material de estudio está representado por secciones transversales (discos) de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. Barret & Golfari de 25 años de edad procedente de las plantaciones establecidas en Uverito (estado Monagas, Venezuela). Se estudiaron seis individuos y se extrajeron discos o secciones transversales de la porción basal del árbol (figura 1a).

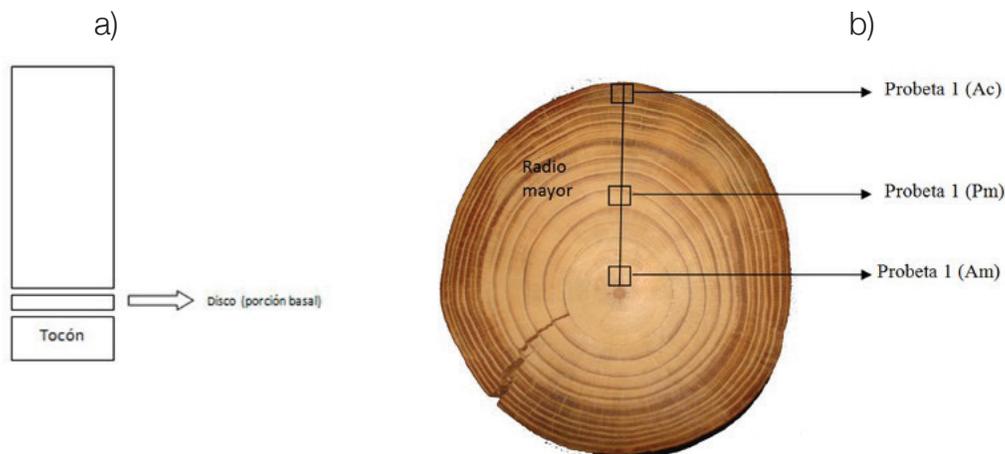


Figura 1. Representación esquemática de la posición de extracción de disco o sección transversal (a) para cada individuo y ubicación de muestra en la sección transversal (b).

En cada sección transversal se determinó el radio mayor (distancia médula - adyacencias del cambium) y se ubicaron muestras en tres posiciones (figura 1b, cuadro 1): adyacencias de médula (Am), punto medio del radio (Pm) y adyacencias del cambium (Ac).

Cuadro 1. Radios de las secciones transversales estudiadas y ubicación de muestras en cada punto (adyacencias de médula, mitad del radio, adyacencias del cambium).

Árbol	Radio cm	Adyacencias de médula cm	Punto medio cm	Adyacencias de zona cambial cm
1	12,00	0,90 - 1,20	5,60 - 5,90	10,00 - 10,90
2	11,60	1,10 - 1,90	5,60 - 6,20	10,50 - 11,00
3	11,10	1,00 - 1,60	5,90 - 6,20	9,60 - 10,00
4	12,30	1,50 - 2,40	6,10 - 6,40	11,00 - 11,40
5	12,80	0,40 - 1,60	5,80 - 6,20	12,40 - 12,80
6	11,70	0,90 - 1,40	5,80 - 6,20	10,50 - 10,90

En cada muestra se ubicaron anillos de crecimiento completos y en la correspondiente al punto medio del radio se delimitó la zona de madera temprana y madera tardía de cada anillo. Las muestras ubicadas en las adyacencias de médula y zona cambial se tomaron de manera que abarcaron todo el anillo de crecimiento en cada una de esas zonas, mientras que la correspondiente al punto medio fue seccionada para tomar muestras en la zona de madera temprana y la zona de madera tardía del anillo de crecimiento.

De cada una se prepararon láminas para observación microscópica de las secciones transversal, radial y tangencial de cada muestra. La preparación se realizó siguiendo los procedimientos estándar de microtecnia xilemática: cada muestra fue sometida a un proceso de ablandamiento en agua hirviendo (4-8 h) para la realización de cortes con un micrótopo de deslizamiento que permitieron obtener láminas o secciones de 25-30 μm de espesor. Las secciones obtenidas fueron sometidas a un proceso de tinción o coloración con una solución de safranina y alcohol al 50 % (1:1) durante 4 h, deshidratación en baños sucesivos de alcohol (50 %, 10 min; 70 %, 10 min; 75 %, 10 min; 95 % 2h) y aclaramiento por inmersión en una mezcla alcohol-xilol (45 min) y xilol (2-3 h). Finalmente se procedió al montaje utilizando bálsamo de Canadá como elemento adhesivo. Se preparó tejido macerado sumergiendo astillas en una solución de peróxido de

hidrógeno y ácido acético glacial (1:1) para llevarlas a estufa durante 12 h. Se realizaron lavados con agua destilada, individualización de elementos celulares (traqueidas) mediante fricción mecánica, tinción con safranina y el respectivo montaje con bálsamo de Canadá. La descripción es de acuerdo a lo establecido en [4].

Tanto la descripción de las características anatómicas como la determinación de características dimensionales de las traqueidas se hizo en un microscopio óptico marca Leica, modelo Galen III. Se tomaron micrografías con una cámara digital Pixelink (PL-B681C) acoplada a un microscopio óptico Nikon, modelo Eclipse E200.

Se realizó un análisis estadístico tanto para los resultados obtenidos en la determinación de la longitud, diámetro total, diámetro del lumen y grosor de paredes de traqueidas. Para el cálculo de grosor de paredes (e) y fracción de pared (FP) se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$e = \frac{(Dt-DI)}{2} \quad (1)$$

e = espesor o grosor de pared

Dt = diámetro total de traqueidas

DI = diámetro del lumen de traqueidas

$$FP = \frac{2e}{Dt} = \quad (2)$$

FP = fracción de pared

2e = dos veces el espesor de traqueidas

Dt = diámetro total de traqueidas

Se calculó la estadística básica (promedio, desviación estándar, valores máximo y mínimo, coeficiente de variación), análisis de varianza ($\alpha = 0,01$) y prueba de diferencia de medias (Tukey, $\alpha = 0,01$).

Resultados y discusión

Descripción anatómica

Pinus caribaea var. hondurensis (Sénécl.) W. H. Barrett & Golfari (figura 2)

Anillos de crecimientos definidos, transición abrupta entre madera temprana y madera tardía. Traqueidas con punteaduras uniseriadas y biseriadas, predominantemente uniseriadas, opuestas. Radios heterocelulares, con traqueidas radiales dentadas, células parenquimáticas radiales con paredes laterales y extremas lisas. Punteaduras del área de cruce de tipo pinoide, 2-4 por área de cruce, radios uniseriados y fusiformes. Canales intercelulares longitudinales y transversales, células epiteliales de paredes delgadas.

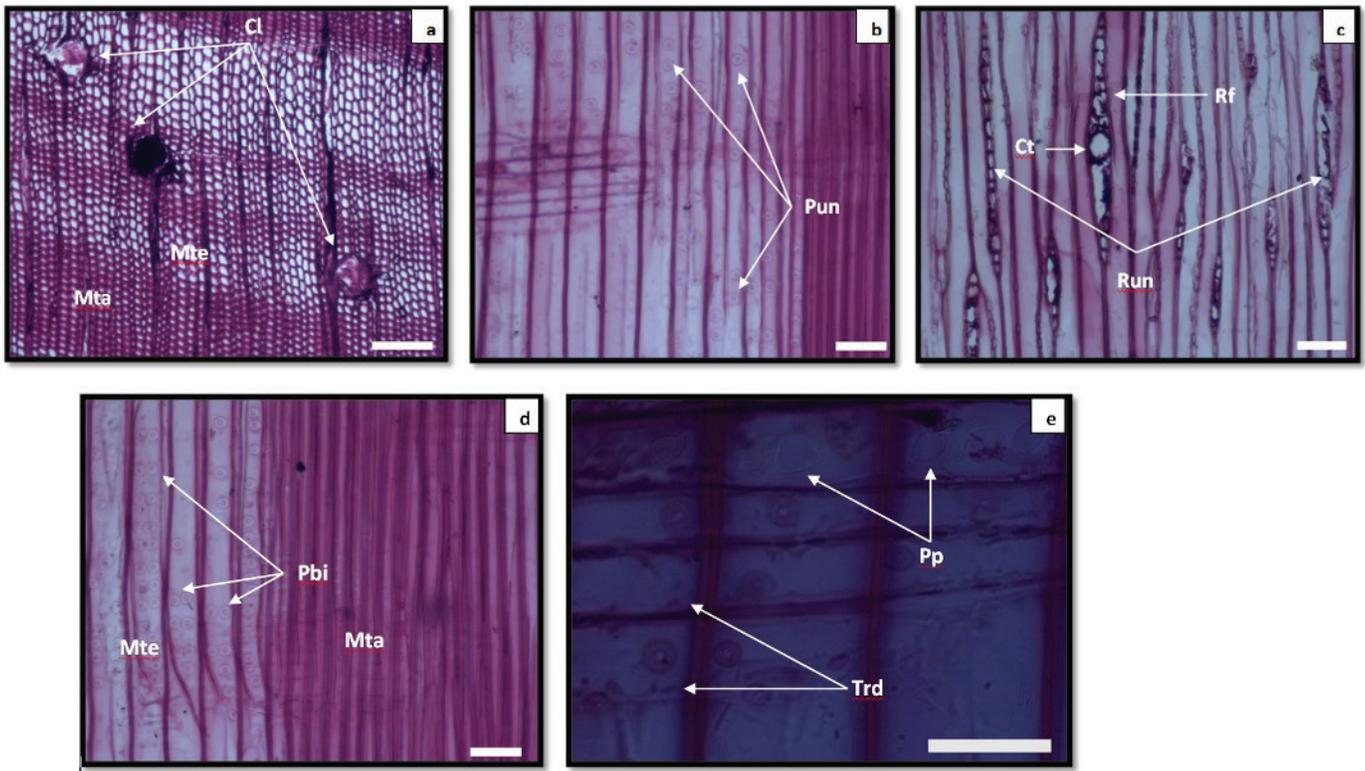


Figura 2. *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. (a) Anillos de crecimiento definidos con transición abrupta entre madera temprana (Mte) y madera tardía (Mta); conductos resiníferos longitudinales (Cl) (Barra = 300 μ m). (b) Traqueidas con puneaduras uniseriadas (Pun) (Barra = 100 μ m). (c) Radios uniseriados (Run) y fusiformes (Rf); conductos resiníferos transversales (Ct) (Barra = 100 μ m). (d) Zonas de madera temprana (Mte) y madera tardía (Mta); puneaduras biseriadas (Pbi) (Barra = 100 μ m). (e) Traqueidas radiales dentadas (Trd); puneaduras de área de cruce de tipo pinoide (Pp) (Barra = 50 μ m).

Diámetro total, del lumen y grosor de paredes de traqueidas

El diámetro total de las traqueidas (cuadro 2) manifestó un comportamiento donde la tendencia más común fue una disminución desde las adyacencias de médula hacia mitad del radio para luego experimentar un incremento. En comparación con otras investigaciones, en *Pinus caribaea* var. *hondurensis* [7] y *Retrophyllum rospigliosii* [8], los menores diámetros los encontraron en las muestras más cercanas a la médula, pero en algunos individuos se observó un incremento continuo a través de toda la sección transversal y en otros se detectó un aumento hasta cierto punto a partir del cual comienza a disminuir.

El comportamiento más constante fue el observado entre la madera temprana y la madera tardía del punto medio de cada muestra (cuadro 2) donde los valores en madera temprana siempre estuvieron por encima de los de madera tardía, con la excepción del árbol 5 donde ambos valores fueron similares. Porcentualmente, las diferencias de diámetro de traqueidas entre madera temprana y tardía oscilaron entre 0 y 25,98 %. Desde el punto de vista estadístico, de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$), en el 66,67 % de los casos no existieron diferencias estadísticamente significativas y sólo en dos muestras (33,33 %) se observaron diferencias significativas. La no existencia de diferencias en diámetro de traqueidas entre las dos zonas estudiadas podría contradecir un aspecto de gran importancia el cual está relacionado con lo indicado por [4] al señalar que la diferenciación de anillos en coníferas está determinado por un incremento del grosor de paredes y una reducción del diámetro radial de las traqueidas.

En las muestras estudiadas, aún cuando hay variaciones en cuanto a valores absolutos, estadísticamente se consideran similares y la posible causa a este comportamiento puede ser debido a dos razones: la primera de ellas puede indicar que, aún cuando hay diferencias de diámetro de traqueidas desde madera temprana a madera tardía, tal vez esa variación no es suficiente como para que sean significativas desde el punto de vista estadístico. La segunda razón puede estar determinada porque las variaciones de diámetro de traqueidas dentro de un anillo de crecimiento se remiten al diámetro radial de las mismas, mientras que el diámetro tangencial tiende a mantenerse aproximadamente constante. Como las mediciones se hicieron sobre tejido macerado, esta metodología no permite diferenciar el tipo de diámetro (radial o tangencial) sobre el cual se está haciendo la medición.

Cuadro 2. Diámetro total y diámetro del lumen de traqueidas (mínimo, promedio, desviación, máximo, número de mediciones, coeficiente de variación) y prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$) para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Diámetro total de traqueidas (μm)				
Árbol	Adyacencias de médula	Punto medio, madera temprana	Punto medio, madera tardía	Adyacencias del cambium
1	(3,750) 5,527 ^c \pm 1,345 (8,130) n = 50; CV = 24,33 %	(3,130) 4,502 ^{a,b} \pm 0,954 (6,250) n = 25; CV = 21,19 %	(2,500) 4,127 ^a \pm 0,92 (6,880) n = 25; CV = 22,29 %	(3,750) 5,090 ^{b,c} \pm 0,818 (6,880) n = 50; CV = 16,07 %
2	(3,750) 4,703 ^a \pm 0,717 (6,880) n = 50; CV = 15,25 %	(3,130) 4,478 ^a \pm 1,016 (6,250) n = 25; CV = 22,69 %	(3,130) 4,203 ^a \pm 0,817 (5,630) n = 25; CV = 19,44%	(3,750) 4,277 ^a \pm 0,637 (6,250) n = 50; CV = 14,89 %
3	(3,750) 4,652 ^a \pm 0,809 (6,880) n = 50; CV = 17,39%	(3,750) 5,677 ^b \pm 0,936 (7,500) n = 25; CV = 16,49 %	(3,130) 4,202 ^a \pm 0,754 (6,250) n = 25; CV = 17,94 %	(3,130) 4,277 ^a \pm 0,637 (5,630) n = 50; CV = 14,89 %
4	(3,750) 4,239 ^{a,b} \pm 0,660 (6,250) n = 50; CV = 15,57 %	(3,130) 4,327 ^{a,b} \pm 1,065 (6,250) n = 25; CV = 24,61 %	(3,130) 3,803 ^a \pm 0,672 (5,000) n = 25; CV = 17,67 %	(3,750) 4,589 ^b \pm 0,775 (6,250) n = 50; CV = 16,89 %
5	(2,500) 4,327 ^{a,b} \pm 0,952 (6,250) n = 50; CV = 22,00 %	(2,500) 3,852 ^a \pm 0,877 (6,250) n = 25; CV = 22,77 %	(3,130) 3,852 ^a \pm 0,561 (5,000) n = 25; CV = 14,56 %	(3,130) 4,577 ^b \pm 0,783 (6,250) n = 50; CV = 17,11 %
6	(3,130) 4,328 ^b \pm 0,816 (6,25) n = 50; CV = 18,85 %	(3,130) 4,202 ^b \pm 0,797 (6,25) n = 25; CV = 18,97 %	(2,500) 3,603 ^a \pm 0,578 (5,000) n = 25; CV = 16,04 %	(3,130) 3,790 ^{a,b} \pm 0,648 (5,000) n = 50; CV = 17,09 %
Diámetro del lumen de traqueidas (μm)				
Árbol	Adyacencias de médula	Punto medio, madera temprana	Punto medio, madera tardía	Adyacencias del cambium
1	(1,880) 4,052 ^c \pm 1,423 (6,250) n = 50; CV = 35,12 %	(1,250) 2,952 ^b \pm 0,963 (5,000) n = 25; CV = 32,62 %	(1,250) 1,726 ^a \pm 0,813 (5,000) n = 25; CV = 47,10 %	(1,880) 3,715 ^{b,c} \pm 1,033 (5,630) n = 50; CV = 27,81 %
2	(1,880) 3,403 ^c \pm 0,848 (5,630) n = 50; CV = 24,92 %	(1,250) 2,577 ^b \pm 0,728 (3,750) n = 25; CV = 28,25 %	(0,630) 1,302 ^a \pm 0,439 (2,500) n = 25; CV = 33,72 %	(1,880) 2,903 ^{b,c} \pm 0,677 (5,000) n = 50; CV = 23,32 %
3	(1,880) 3,153 ^b \pm 0,856 (5,630) n = 50; CV = 27,15 %	(1,880) 3,402 ^b \pm 1,184 (6,250) n = 25; CV = 34,80 %	(0,630) 1,877 ^a \pm 0,675 (3,130) n = 25; CV = 35,96 %	(1,250) 2,202 ^a \pm 0,538 (3,750) n = 50; CV = 24,43 %
4	(1,250) 2,327 ^b \pm 0,799 (4,380) n = 50; CV = 34,34 %	(0,630) 1,677 ^a \pm 0,801 (4,380) n = 25; CV = 47,76 %	(0,630) 1,427 ^a \pm 0,461 (2,500) n = 25; CV = 32,31 %	(1,250) 2,503 ^b \pm 0,846 (5,000) n = 50; CV = 33,79 %
5	(1,250) 2,152 ^b \pm 0,738 (3,750) n = 50; CV = 34,29 %	(0,630) 1,952 ^{a,b} \pm 1,026 (4,380) n = 25; CV = 52,56 %	(0,630) 1,402 ^a \pm 0,416 (1,880) n = 25; CV = 29,67 %	(1,250) 2,553 ^b \pm 0,806 (5,000) n = 50; CV = 31,57 %
6	(1,250) 2,003 ^b \pm 0,505 (3,130) n = 50; CV = 25,21 %	(1,250) 2,077 ^b \pm 0,692 (3,750) n = 25; CV = 33,32%	(0,630) 1,428 ^a \pm 0,585 (2,500) n = 25; CV = 40,97 %	(0,630) 1,965 ^b \pm 0,645 (3,130) n = 50; CV = 32,82 %

Nota: Letras diferentes representan grupos estadísticamente diferentes de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).

Con respecto al diámetro del lumen (cuadro 2), la tendencia observada es una reducción desde la zona medular hacia el punto medio para luego aumentar hacia las cercanías de la zona cambial; excepto en un árbol donde se observó un decrecimiento continuo desde la médula hacia el cambium. [7] menciona que para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* encontró un incremento del diámetro del lumen desde la zona medular hasta los anillos 3-7, para luego tener un comportamiento irregular hacia las zonas cercanas a la corteza y señala que, estadísticamente, se observa una variación sin ninguna tendencia definida. Por otra parte, [8] encontraron un incremento del diámetro del lumen en *Retrophyllum rospigliosii* hasta, aproximadamente, los anillos 4-8 para luego mostrar una tendencia a la estabilización. Con respecto a las diferencias de diámetro del lumen entre madera temprana y tardía determinados a mitad del radio (cuadro 2), los valores siempre fueron mayores en la zona de madera temprana y las diferencias mostraron significancia estadística en la mayoría de los casos.

Porcentualmente, el decrecimiento del diámetro del lumen desde leño temprano hacia el tardío osciló entre un mínimo de 14,91 % y un máximo de 49,48 %. [9], estudiando *Pinus radiata*, encontró valores superiores de diámetro de lumen en madera temprana pero las diferencias no mostraron significancia estadística.

El comportamiento en cuanto a grosor de paredes desde la zona cercana a la médula hacia la zona cambial, comúnmente se manifestó como un aumento desde las adyacencias de la médula hasta el punto medio para luego disminuir y alcanzar en las cercanías de la corteza valores cercanos a los observados en el punto inicial (cuadro 3). Por lo general, los valores de la zona medular no mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto a los de la zona cercana al cambium, pero si existieron diferencias significativas respecto al punto medio. En relación a las diferencias de espesor entre madera temprana y tardía observados en el punto medio de la sección transversal, el comportamiento general fue un aumento de espesor desde madera temprana hacia madera tardía (cuadro 3) excepto en el árbol 4 donde se presentó una disminución no significativa estadísticamente. Los aumentos porcentuales mostraron una alta variación y tomando en consideración los cinco árboles donde aumentó el espesor de pared desde madera temprana hacia tardía, los valores oscilaron entre 2,1 y 34,48 %. En el único caso donde se presentó una reducción de grosor de paredes, éste representó el 11,19 %. En comparación con otros estudios, [9] encontró un aumento de grosor de paredes de madera temprana a tardía en *Pinus radiata* pero sin diferencias estadísticamente significativas; mientras que [10], estudiando *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, encontró diferencias significativas entre madera temprana y madera tardía pero las diferencias en dirección médula-corteza no fueron tan marcadas, aunque encontró una tendencia al aumento desde las adyacencias de médula hacia el punto medio para luego disminuir. Con respecto a la fracción de pared celular (cuadro 3), los valores observados muestran una tendencia al aumento desde las adyacencias de médula hacia el punto medio para luego disminuir hacia la zona cambial observándose que, en la mayoría de los casos, existen diferencias estadísticamente significativas (Tukey = 0,01) entre la zona medular y el punto medio pero no hay diferencias entre la zona medular y las adyacencias de la zona cambial. Con respecto a los valores observados entre madera temprana y madera tardía, en todos los casos se observó un incremento donde la mayor diferencia entre las dos zonas se presentó en el árbol 2 con 41,5 % de pared celular en madera temprana y 69,13 % en madera tardía; mientras que la menor diferencia fue en el árbol 4 con 61,14 % y 62,69 % en madera temprana y tardía respectivamente. En todos los casos, con la excepción del árbol 4, las diferencias entre las dos zonas fueron estadísticamente significativas.

Cuadro 3. Espesor y fracción de paredes de traqueidas (mínimo, promedio, desviación, máximo, número de mediciones, coeficiente de variación) y prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$) para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Espesor de pared de traqueidas (μm)				
Árbol	Adyacencias de médula	Punto medio, madera temprana	Punto medio, madera tardía	Adyacencias del cambium
1	(0,310) 0,739 ^a \pm 0,234 (1,560) n = 50; CV = 31,66 %	(0,310) 0,775 ^a \pm 0,273 (1,560) n = 25; CV = 35,23 %	(0,630) 1,200 ^b \pm 0,410 (1,880) n = 25; CV = 34,17 %	(0,310) 0,689 ^a \pm 0,236 (1,250) n = 50; CV = 34,25 %
2	(0,310) 0,651 ^a \pm 0,289 (1,560) n = 50; CV = 44,39 %	(0,310) 0,950 ^b \pm 0,418 (1,880) n = 25; CV = 44,00 %	(0,940) 1,450 ^c \pm 0,324 (2,190) n = 25; CV = 22,34 %	(0,310) 0,689 ^a \pm 0,261 (1,250) n = 50; CV = 37,88 %
3	(0,310) 0,751 ^a \pm 0,275 (1,250) n = 50; CV = 36,62 %	(0,310) 1,138 ^b \pm 0,412 (1,880) n = 25; CV = 36,20 %	(0,630) 1,163 ^b \pm 0,388 (1,880) n = 25; CV = 33,36 %	(0,630) 1,039 ^b \pm 0,263 (1,560) n = 50; CV = 25,31 %
4	(0,310) 0,957 ^a \pm 0,376 (2,190) n = 50; CV = 39,29 %	(0,630) 1,325 ^b \pm 0,496 (2,190) n = 25; CV = 37,43 %	(0,630) 1,188 ^{a,b} \pm 0,271 (1,880) n = 25; CV = 22,81 %	(0,310) 1,045 ^{a,b} \pm 0,402 (2,190) n = 50; CV = 38,47 %
5	(0,310) 1,088 ^{a,b} \pm 0,297 (1,560) n = 50; CV = 27,29 %	(0,310) 0,950 ^a \pm 0,331 (1,560) n = 25; CV = 34,84 %	(0,630) 1,225 ^b \pm 0,237 (1,560) n = 25; CV = 19,35 %	(0,310) 1,013 ^{a,b} \pm 0,406 (1,880) n = 50; CV = 40,08 %
6	(0,630) 1,164 ^b \pm 0,384 (2,190) n = 50; CV = 32,99 %	(0,630) 1,063 ^{a,b} \pm 0,299 (1,560) n = 25; CV = 28,13 %	(0,630) 1,088 ^{a,b} \pm 0,223 (1,560) n = 25; CV = 20,49 %	(0,630) 0,914 ^a \pm 0,234 (1,560) n = 50; CV = 25,60 %
Fracción de pared de traqueidas (%)				
Árbol	Adyacencias de médula	Punto medio, madera temprana	Punto medio, madera tardía	Adyacencias del cambium
1	(16,670) 28,345 ^a \pm 12,030 (62,500) n = 50; CV = 42,44 %	(16,670) 35,228 ^a \pm 11,738 (62,500) n = 25; CV = 33,32 %	(27,270) 58,048 ^b \pm 14,049 (75,000) n = 25; CV = 24,20 %	(10,000) 27,949 ^a \pm 11,486 (57,140) n = 50; CV = 41,09 %
2	(11,110) 27,969 ^a \pm 12,24 (55,560) n = 50; CV = 43,75 %	(20,000) 41,501 ^b \pm 14,359 (66,670) n = 25; CV = 34,59 %	(50,000) 69,126 ^c \pm 8,123 (85,710) n = 25; CV = 11,75 %	(16,670) 32,169 ^a \pm 11,599 (57,140) n = 50; CV = 36,06 %
3	(14,290) 32,564 ^a \pm 11,697 (57,140) n = 50; CV = 35,92 %	(9,090) 40,764 ^{a,b} \pm 14,342 (62,500) n = 25; CV = 35,18 %	(28,570) 55,176 ^c \pm 14,701 (83,330) n = 25; CV = 26,64 %	(25,000) 48,526 ^{b,c} \pm 10,618 (71,430) n = 50; CV = 21,88 %
4	(12,500) 41,195 ^a \pm 16,163 (71,430) n = 50; CV = 39,24 %	(30,000) 61,140 ^b \pm 15,901 (80,000) n = 25; CV = 26,01 %	(33,330) 62,686 ^b \pm 10,037 (80,000) n = 25; CV = 16,01 %	(14,290) 45,494 ^a \pm 15,018 (77,780) n = 50; CV = 33,01 %
5	(25,000) 50,549 ^a \pm 11,375 (71,430) n = 50; CV = 22,50 %	(12,500) 51,389 ^a \pm 19,098 (80,000) n = 25; CV = 37,16 %	(40,000) 63,763 ^b \pm 9,855 (80,000) n = 25; CV = 15,46 %	(14,290) 43,983 ^a \pm 14,924 (75,000) n = 50; CV = 33,93 %
6	(33,330) 53,078 ^{a,b} \pm 10,795 (75,000) n = 50; CV = 20,34 %	(33,330) 50,889 ^a \pm 12,485 (66,670) n = 25; CV = 24,53 %	(33,330) 61,309 ^b \pm 13,193 (80,000) n = 25; CV = 21,52 %	(28,570) 48,817 ^a \pm 12,111 (80,000) n = 50; CV = 24,81 %

Nota: Letras diferentes representan grupos estadísticamente diferentes de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).

Cuadro 4. Longitud de traqueidas en micras (mínimo, promedio, desviación, máximo, número de mediciones, coeficiente de variación) y prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$) para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Árbol	Adyacencias de médula	Punto medio, madera temprana	Punto medio, madera tardía	Adyacencias del cambium
1	(2121,00) 3013,638 ^b ± 609,34 (4635,90) n = 50; CV = 20,22 %	(4605,60) 4925,57 ^d ± 200,05 (5241,90) n = 25; CV = 4,06 %	(3484,50) 4374,11 ^c ± 365,90 (4908,60) n = 25; CV = 8,37 %	(1939,20) 2406,43 ^a ± 317,91 (2969,40) n = 50; CV = 13,21 %
2	(2333,10) 2756,69 ^a ± 307,21 (3787,50) n = 50; CV = 11,14 %	(3393,60) 3751,14 ^b ± 206,62 (4181,40) n = 25; CV = 5,51 %	(2969,40) 3714,78 ^b ± 360 (4302,60) n = 25; CV = 9,69 %	(2363,40) 2793,66 ^a ± 221,98 (3181,50) n = 50; CV = 7,95 %
3	(333,30) 2814,26 ^a ± 470,67 (3575,40) n = 50; CV = 16,72 %	(3939,00) 4529,24 ^c ± 279,51 (4999,50) n = 25; CV = 6,17 %	(3787,50) 4146,25 ^b ± 174,87 (4454,10) n = 25; CV = 4,22 %	(2424,00) 2913,65 ^a ± 242,43 (3575,40) n = 50; CV = 8,32 %
4	(2787,60) 3415,42 ^b ± 317,56 (4242,00) n = 50; CV = 9,29 %	(3484,50) 3781,44 ^c ± 155,98 (4120,80) n = 25; CV = 4,12 %	(3878,40) 4185,04 ^d ± 218,90 (4545,00) n = 25; CV = 5,23 %	(1969,50) 2563,38 ^a ± 251,95 (3181,50) n = 50; CV = 9,83 %
5	(2272,50) 2744,57 ^a ± 263,30 (3333,00) n = 50; CV = 9,59 %	(3333,00) 3591,16 ^b ± 191,66 (4060,20) n = 25; CV = 5,34 %	(3605,70) 4154,74 ^c ± 268,08 (4605,60) n = 25; CV = 6,45 %	(2121,00) 2608,22 ^a ± 250,672 (3090,60) n = 50; CV = 9,61 %
6	(2666,40) 3234,20 ^a ± 325,99 (4060,20) n = 50; CV = 10,08 %	(3484,50) 3780,23 ^b ± 189,28 (4120,80) n = 25; CV = 5,01 %	(3878,40) 4474,70 ^c ± 342,55 (4999,50) n = 25; CV = 7,66 %	(2575,50) 3097,27 ^a ± 300,47 (3757,20) n = 50; CV = 9,70 %

Nota: Letras diferentes representan grupos estadísticamente diferentes de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha = 0,01$).

Longitud de traqueidas

La longitud promedio de las traqueidas (cuadro 4) manifestó un aumento desde las adyacencias de médula hacia el punto medio para luego disminuir. La diferencia entre el punto cercano a la médula mostró significancia estadística (Tukey $\alpha = 0,01$) con respecto al punto medio y este último también mostró diferencias significativas con relación al punto adyacencias a la zona cambial. En la mayoría de los casos la reducción entre estos dos últimos puntos de medición, estadísticamente mantiene semejanza con relación al punto inicial.

El incremento porcentual entre las cercanías de la médula y el punto medio osciló entre 16,63 % (árbol 4) y 54,28 % (árbol 1).

El patrón de variación en sentido radial indica la existencia de madera adulta a partir del punto medio de la sección transversal, aspecto que coincide con lo reportado por [6] en plantaciones de 15 y 20 años en el oriente venezolano. Por otra parte, [7] señala que en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de 17 años de edad, la longitud de traqueidas cercanas a la médula presenta menores valores que las de las adyacencias de la corteza.

En relación a las diferencias de longitud de traqueidas entre madera temprana y tardía, se observó un comportamiento irregular: en dos árboles (33,33 % del material estudiado) se encontró mayor longitud en madera temprana; en tres individuos (50 %), los mayores valores se ubicaron en la zona de madera tardía y en el individuo restante (16,67 %) no existieron diferencias entre madera temprana y tardía. Esta irregularidad de comportamiento coincide con lo encontrado por [10] donde en el 66 % de las muestras estudiadas, las menores longitudes correspondieron a madera temprana.

Conclusiones

- a) Las dimensiones transversales de las traqueidas mostraron un comportamiento irregular desde la médula hacia la corteza y se alternaron la ocurrencia de menores valores en cercanías de la médula en algunos árboles, y en cercanías del cambium en otros. El comportamiento más uniforme fue la tendencia a desarrollarse mayores grosores de pared en el punto medio.
- b) El diámetro del lumen, diámetro total, espesor de pared y fracción de pared mostraron uniformidad al establecer las respectivas comparaciones entre madera temprana y tardía del anillo de crecimiento. De manera constante, los diámetros mayores totales y del lumen correspondieron a la madera temprana mientras que los mayores grosores y fracción de pared se concentraron hacia la madera tardía.
- c) La longitud de traqueidas aumenta desde la zona cercana a la médula hasta el punto medio de la sección transversal para, posteriormente, disminuir hacia las adyacencias del cambium y alcanzar valores muy similares a los del punto inicial. Esto indica que a partir del punto medio de la sección transversal se puede considerar que se inicia la formación de madera adulta. Por otra parte, dentro de un anillo de crecimiento no se encontró un patrón de variación uniforme de longitud de traqueidas: en el 50 % de los árboles, las longitudes menores correspondieron a madera tardía y el 50 % restante los valores menores se ubicaron en madera temprana.
- d) Los cambios que se presentan a lo largo del radio siempre serán bastante irregulares ya que, resulta engorrosa la delimitación exacta y precisa de las partes de madera temprana y madera tardía, a menos que se tenga implementos de alta tecnología como por ejemplo un cortador rayo láser para realizar dichos cortes y así obtener resultados con la mayor confiabilidad y satisfacción posible.

Referencias

- [1] León H., W. (2010). *Anatomía y densidad o peso específico de la madera*. Revista Forestal Venezolana, 1 (54), 67 - 76.
- [2] Arroyo, J. (2003). *Propiedades físico-mecánicas de la madera*. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela.
- [3] Pashin, A. & C. de Zeeuw. (1980). *Textbook in wood technology*. McGraw-Hill. Series in forest resources. New York, USA.
- [4] IAWA Committee. (Published for the International Association of Wood Anatomists). (2004). List of microscopic features for softwood identification. IAWA Journal, 25(1), 1–70.
- [5] Tamarit, J. (1996). *Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas*. Revista Madera y Bosques, 2 (2), 29 - 41.
- [6] Trejo, E. (2006). *Determinación de la proporción de madera juvenil en la especie Pinus caribaea var. hondurensis en plantaciones de 10, 15 y 20 años (Chaguaramas Norte y Guayamure) bajo jurisdicción de la Empresa Terranova* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela.

- [7] Vásquez, A. (1998). *Variación de las características anatómicas y de la densidad básica de la madera en árboles de Pinus caribaea Morelet var. hondurensis Barret y Golfari en función del espaciamiento de plantación*. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, 51(1), 91 - 122.
- [8] Vásquez, A. y E. Alcántara. (2009). *Anatomía y densidad de la madera de árboles de pino romerón (Retrophyllum rospigliosii (Pilger) C. N. Page de ocho años de edad*. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, 62 (1), 4869-4880.
- [9] Salvo, L. (2004). *Relación de la estructura anatómica con la permeabilidad y tasa de secado de la madera de Pinus radiata D. Don* (Tesis de Postgrado). Universidad de Bio-Bío. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería en Maderas. Concepción, Chile.
- [10] Rojas, A. (2016). *Estudio de variabilidad de la madera de Pinus caribaea var. hondurensis (Sénécl) W. H. Barret & Golfari (Pino Caribe) en Villanueva. Casanare, Colombia* (Tesis de Postgrado). Universidad de Los Andes. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Mérida, Venezuela.

Diseño e implementación de un sistema automático de control para la regulación y monitoreo de las condiciones internas del secador solar térmico forzado híbrido

Design and implementation of an automatic control system for the regulation and monitoring of the internal conditions of the forced hybrid thermal solar dryer

Pablo José Molina-Hernández¹, Guillermo Castro-Badilla²,
Tomás de Jesús Guzmán-Hernández³

Fecha de recepción: 24 de abril de 2021
Fecha de aprobación: 19 de julio de 2021

Molina-Hernández, P.J; Castro-Badilla, G; Guzmán-Hernández, T.J. Diseño e implementación de un sistema automático de control para la regulación y monitoreo de las condiciones internas del secador solar térmico forzado híbrido. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 94-116.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5679>

- 1 Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos. Costa Rica. Correo electrónico: molinapij04@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8229-0643>
- 2 Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos. Costa Rica. Correo electrónico: gucastro@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7159-9845>
- 3 Área académica del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos. Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2719-8550>

Palabras clave

Automatización; PLC; LOGO!; escotilla; deshumidificador; secador solar térmico; forzado híbrido.

Resumen

Para el secado y deshidratación de productos agrícolas, el Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos, cuenta con un secador solar térmico forzado híbrido con respaldo de gas LP. El sistema forzado consiste en la circulación, mediante turbinas, de aire y agua caliente por la cámara de secado.

El sistema híbrido consiste en la utilización de energía solar y de gas natural para la elevación de la temperatura, en el interior de la cámara de secado o deshidratación. Para el proceso de control de humedad, el secador utiliza un sistema manual. Las desventajas del proceso manual de control de humedad incluyen (a) dependencia a un operador para el encendido/apagado del sistema, (b) no permite la adaptación del sistema a las condiciones ambientales circundantes al secador, (c) alto consumo energético para llegar a las condiciones de humedad requeridas para el almacenamiento y procesamiento de los productos agrícolas.

Se tuvo como objetivo la mejora del actual secador por medio de la automatización del proceso de humedad y temperatura. El sistema propuesto utiliza un PLC (Controlador Lógico Programable por sus siglas en inglés) para el control de humedad, y permite el monitoreo de las variables de humedad y temperatura, tanto interna como externa a la cámara de secado.

Los principales resultados de la investigación son una mejora en la eficiencia del secador al disminuir el tiempo en el que se alcanza los niveles óptimos de secado y la implementación de un sistema de monitoreo y visualización de las variables involucradas.

Keywords

Automation; PLC; LOGO!; damper; dehumidifier; forced hybrid solar dryer.

Abstract

For the drying and dehydration of agricultural products, the Instituto Tecnológico de Costa Rica, San Carlos Local Campus has a hybrid forced thermal solar dryer with LP gas backup. The forced system consists of the circulation, by means of turbines, of hot air and hot water through the drying chamber.

The hybrid system consists of using solar energy and natural gas to raise the temperature, inside the drying or dehydration chamber. For the humidity control process, the dryer uses a manual system. The disadvantages of the manual humidity control process include (a) reliance on an operator to turn the system on and off, (b) it does not allow adaptation of the system to the environmental conditions around the drying chamber, (c) high energy consumption to reach the humidity conditions required for the storage and processing of agricultural products.

The aim was to improve the current dryer by automating the humidity and temperature process. The proposed system uses a PLC (Programmable logic controller) for humidity control, and allows monitoring of humidity and temperature variables, both internal and external to the drying chamber.

The investigation's main results are an improvement in the efficiency of the solar dryer by reducing the time in which optimum dry levels are reached and the implementation of a monitoring and visualization system for the variables involved.

Introducción

En cada uno de los procesos que se realizan en la industria es necesario ejercer un control sobre las diferentes variables que de alguna manera intervienen en los mismos, para poder así asegurar las condiciones óptimas de calidad en los resultados finales [1].

El secado de granos se puede definir de distintas maneras, según el enfoque que se desee adoptar. Los estudios más teóricos dan énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y materia. Así, el secado se puede definir como un proceso en el cual hay un intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente de secado y los granos. En cambio, en los casos generales, se define el secado como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para el almacenamiento de éste [2].

Se entiende que un nivel de humedad es seguro, cuando por debajo de este se reduce la actividad respiratoria de los granos y se dificulta el ataque de insectos y hongos. Dicho nivel varía con los distintos tipos de granos, pero en general, varía entre un 10% y un 14% de humedad expresada sobre base húmeda [3].

Un sistema de secado debe permitir eliminar la humedad excesiva de los granos a corto plazo y asegurar su conservación. Por otra parte, el poder contar con un método de conservación que logre asegurar y mantener la calidad de los granos es de gran importancia, pues garantiza satisfacer los abastecimientos de alimentos a la población y los animales por periodos prolongados [4].

Por las razones mencionadas, es necesario el desarrollo de tecnologías modernas que permitan almacenar grandes volúmenes de granos y que generen una mayor innovación del potencial productivo. En contribución a esto, el equipo de investigación del DOCINADE (Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo), actualmente realiza investigaciones en la aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de nuestro país [5].

Este proyecto tiene como objetivo el generar un sistema automático de control para la regulación de condiciones internas de la cámara de secado de granos del sistema térmico forzado híbrido con gas LP, específicamente las condiciones de temperatura y humedad.

Con el mejoramiento en el sistema de la cámara de secado se ayudará de esta manera a los productores a no perder sus semillas debido a enfermedades u organismos, conllevando mejores resultados en el proceso; utilizar energías limpias para alimentar el sistema y acortar los tiempos de secado, lo cual generaría más ganancias al poder disminuir los tiempos de exposición y secar o deshidratar más granos, así como otros productos agropecuarios, de los que se puede actualmente.

El secador híbrido forzado ubicado en las instalaciones del Campus Tecnológico Local San Carlos, funciona con diferentes mecanismos para lograr el secado de las semillas: colectores solares o captadores solares, los cuales son un dispositivo diseñado para recoger (colectar) la energía recibida del sol y elevar la temperatura de un fluido, en este caso agua y aire; ambos fluidos se hacen circular en el interior de la cámara de secado para elevar la temperatura en su

interior y por último una estufa que funciona con gas natural para calentar el agua, para los días de invierno donde es insuficiente la energía proveniente del sol. La figura 1 muestra el diagrama general del sistema del secador solar térmico forzado híbrido con respaldo de gas LP.

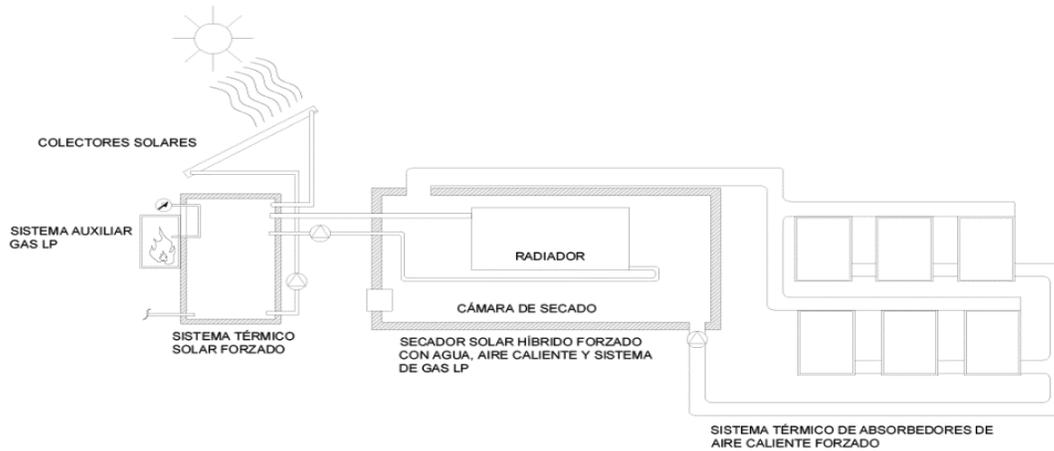


Figura 1. Diagrama general del sistema del secador solar térmico forzado híbrido con respaldo de gas LP. Fuente: [5]

Dentro de la estructura del secador se encuentra una escotilla de forma circular, de un diámetro de 26 cm (figura 6), encargada de regular la humedad y temperatura dentro de la cámara de secado, sin embargo, esta era completamente manual. Sin importar las variaciones en los niveles, tanto interior como exterior, de humedad, o temperatura, la escotilla se mantenía abierta a un nivel medio, salvo cuando se pronosticaban días de intensas lluvias, en ese momento se cerraba por completo por un operario.

Debido a esto, se retrasaba el tiempo en el cual se lograban los niveles óptimos mínimos de humedad para los granos, principalmente por el flujo de humedad proveniente del exterior ya que los granos son un material higroscópico, o sea que ajusta su humedad a la de la atmósfera que lo rodea en función de la temperatura.

Materiales y métodos (metodología)

El interés en realizar el proyecto radica en innovar y optimizar el sistema del secador solar térmico forzado híbrido con respaldo de gas LP, por lo cual se plantearon ciertos requerimientos y restricciones que se enlistan a continuación:

- Utilización de componentes industriales, que soporten altos niveles de humedad.
- Reducción del costo de mano de obra, al automatizar las tareas.
- Sistema que ahorrase en costos adicionales como mantenimiento, operación y energía.
- Mostrar datos en tiempo real de las condiciones de humedad y temperatura, internas y externas al secador.
- Que el sistema a implementar pueda ser utilizado en otros proyectos, debido a que se busca implementar más secadores de este tipo en el país.

Basado en estos requerimientos y restricciones se decidió basar la solución en un sistema PLC, específicamente en el LOGO! de Siemens. Estos aparatos eléctricos han revolucionado la automatización tanto a pequeña como a gran escala, debido a que no sólo reflejan un ahorro en

operación, sino que simplifican los procedimientos en los que antes se encontraba un equipo completo de operarios. Además, que han ido sustituyendo controles basados en circuitos eléctricos, relés, interruptores y otros componentes.

La solución implementada se describe de manera general en el diagrama de bloques de la Figura 2, donde se observa los sensores y actuadores que involucran el control de humedad del secador. Mientras tanto, en la Figura 3, se muestra un diagrama general de conexiones de la solución implementada, donde se considera un PLC que recibe, analiza y envía señales, la alimentación y protección del sistema, así como los actuadores y sensores.

Se decidió utilizar el cacao, como producto agrícola de prueba, debido a la importancia de este producto agrícola para la región Huetar Norte, como se observó en la investigación llevada a cabo por el DOCINADE: “Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica” donde se ha tenido un gran impacto en la región, y se ha replicado el sistema de secador en diferentes proyectos de producción de cacao.

A partir de esta decisión, se realiza una investigación sobre el proceso de producción de cacao, desde el cultivo hasta el secado, pasando por los procesos de fermentación de las semillas. Al realizar diferentes visitas a los proyectos en los cuales se ha implementado el sistema se conoció como el sistema mejoró los tiempos y la calidad del producto final, pero en todos los casos la escotilla seguía siendo manual, generando un costo de operario para modificar el nivel de apertura de esta.

El nivel de apertura de la escotilla era plenamente arbitrario, el operario modificaba el nivel de apertura de la misma a partir de las condiciones climáticas externas del secador, sin considerar las condiciones de humedad y temperatura del interior de la cámara de secado. Además de no estar disponible en horas de la madrugada para modificar el nivel de apertura.

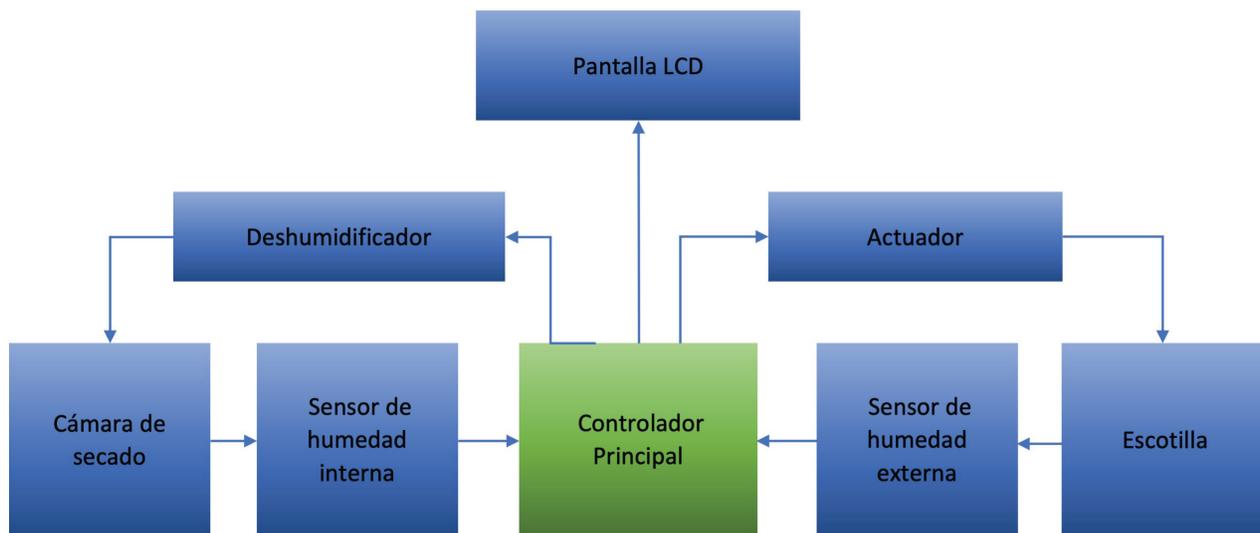


Figura 2. Diagrama de bloques general de la solución implementada.

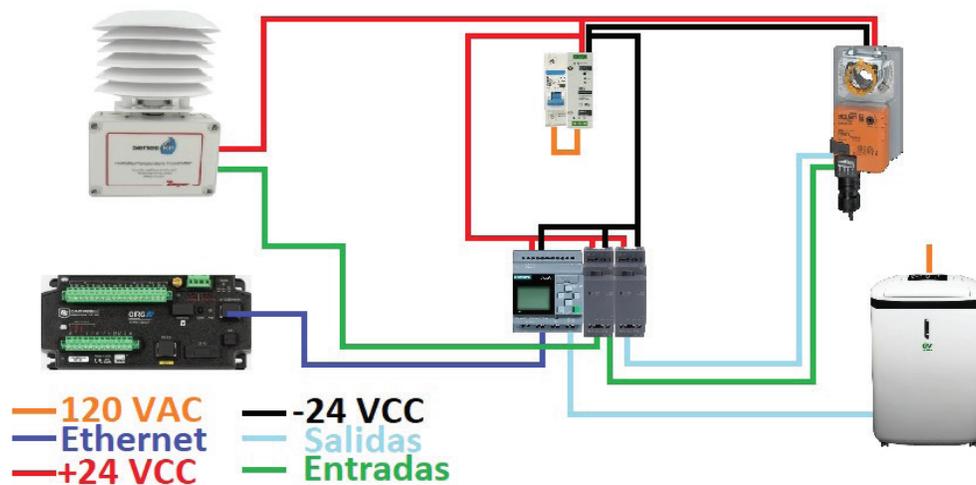


Figura 3. Diagrama general de conexiones de la solución implementada.

Diseño de las pruebas de secado

Para cada una de las seis pruebas realizadas se utilizaron 16 kg de cacao fermentado provenientes de La Cuna del Cacao, una empresa cacaotera de San Rafael de Guatuso propiedad del señor Elías Cruz Quintanilla.

Al principio de cada prueba se colocaron 2 kg de cacao en cada bandeja para observar su pérdida de masa a lo largo del tiempo y se realizaron las mediciones de masa siempre a la misma hora (9 am, 1 pm y 5 pm).

Una vez que se observó una estabilización del cacao se utilizó el medidor de humedad de granos G600i, el cual muestra una medida aproximada de la humedad en el grano. Posteriormente, conforme se acercó la medida a un 8% de humedad en el G600i, se buscó tener 3 mediciones de masa iguales, sin ninguna variación.

Una vez obtenidas estas medidas se utilizó el medidor de humedad XM60, el cual permite determinar de manera rápida y fiable, por el procedimiento de la termogravimetría, la humedad contenida en los granos. El medidor de humedad XM60 se utilizó también para medir la humedad inicial de los granos de cacao el día que se ingresaron a la cámara de secado para cada una de las pruebas.

Antes de la implementación del sistema de automatización se realizaron tres pruebas para observar el funcionamiento del secador solar híbrido forzado. En cada prueba se varió y se dejó fijo el nivel de apertura de la escotilla, sin importar las condiciones atmosféricas o del interior de la cámara de secado. Las variaciones se hicieron a un 100%, 50% y 25% de la apertura de la escotilla.

Una vez implementado el sistema de automatización se realizaron tres pruebas para comprobar la mejora en la eficiencia del secador solar térmico forzado híbrido con respaldo de gas LP. En cada prueba se trabajó el sistema electrónico con los parámetros establecidos.

Sistema electrónico implementado

La figura 4 muestra la colocación actual del *datalogger* CR6 y el gabinete eléctrico del LOGO! en el cuarto de máquinas del secador solar térmico.

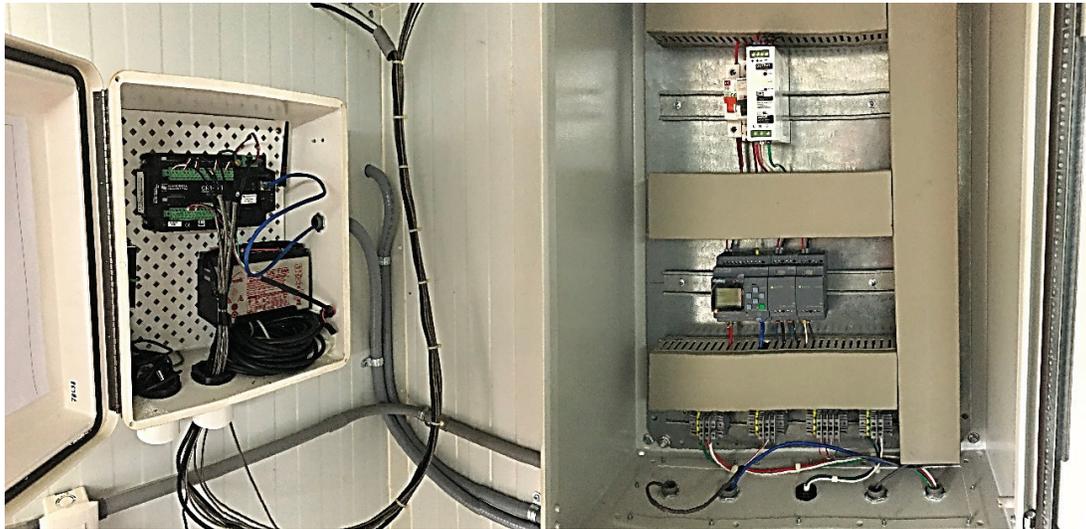


Figura 4. Datalogger CR6 y gabinete eléctrico del LOGO!.

La figura 5 muestra la instalación del deshumidificador portátil Deumido M20. El deshumidificador está colocado de tal forma que se ajusta con una abertura en la pared que conecta a la cámara de secado, para que se absorba de manera adecuada el aire húmedo. En la parte superior cuenta con un armazón de acero inoxidable que conecta la salida de aire seco del deshumidificador a la cámara de secado. Se le realizó la conexión de una manguera plástica a la salida del agua condensada dentro del deshumidificador, para que esta sea depositada en el exterior del secador.

En la figura 6, se muestra la adaptación realizada para el actuador AMB24-SR y la escotilla. Por otra parte, la figura 7, muestra el sensor RHP-2R11 en su posición actual. Cabe destacar que tanto el actuador como el sensor se encuentran protegidos por el techo del secador, con el fin de evitar corrosión por lluvia.



Figura 5. Instalación del deshumidificador portátil Deumido M20.



Figura 6. Instalación del actuador AMB24-SR en la escotilla del secador.



Figura 7. Instalación del sensor de humedad y temperatura RHP-2R11.

Las diferentes pantallas diseñadas, figura 8, se realizaron con el fin de mostrar en cada una la información necesaria en tiempo real de los niveles de humedad y temperatura al interior y al exterior del secador, así como el estado de los actuadores, para así poder monitorear y comparar las condiciones que están influyendo directamente en el proceso de secado. Estas pantallas son navegables mediante los botones del LOGO!.

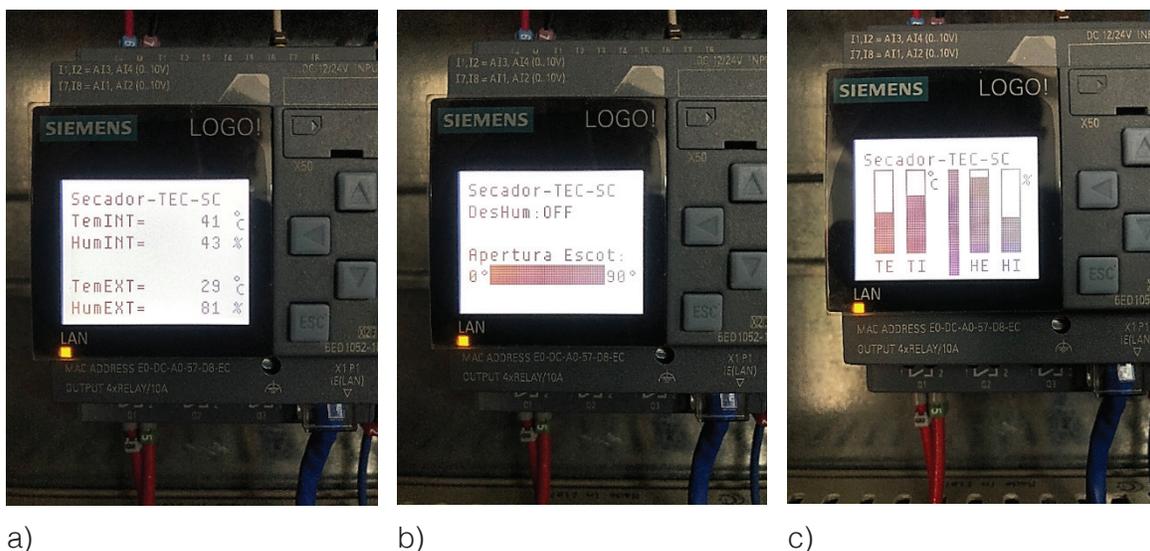


Figura 8. a) Pantalla de observación de datos. b) Pantalla de estado de los actuadores c) Pantalla de comparación de datos.

Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos antes y después de la implementación de la automatización del sistema.

Resultados sin implementación del sistema electrónico

En los siguientes apartados se mostrarán los gráficos de medida de “Masa del cacao” (kg) vs “Tiempo” (días), así como las gráficas de medidas de humedad y temperatura dentro del secador durante el tiempo de cada prueba. También se mostrarán los cuadros que indican la humedad inicial y final en los granos de cacao.

En el cuadro 1 se tabula la humedad inicial promedio de los granos de cacao para las pruebas realizadas a un 100%, 50% y 25% de nivel de apertura de la escotilla.

Cuadro 1. Contenido de humedad inicial promedio de los granos de cacao para las pruebas realizadas a un 100%, 50% y 25% de nivel de apertura de la escotilla.

# de Bandeja	%HR Inicial (*)	%HR Inicial (**)	%HR Inicial (***)
2	49,04	-	-
7	50,39	-	-
5	49,14	-	-
6	-	51,51	-
8	-	47,46	-
1	-	49,77	-
4	-	-	48,94
3	-	-	46,27
5	-	-	49,20
Promedio	49,52	49,58	48,14

En el cuadro 2 se tabula la humedad alcanzada en los granos de cacao para las pruebas realizadas a un 100%, 50% y 25% de nivel de apertura de la escotilla.

Cuadro 2. Contenido de humedad alcanzado en los granos de cacao para las pruebas realizadas a un 100%, 50% y 25% de nivel de apertura de la escotilla.

# de Bandeja	%HR Inicial (*)	%HR Inicial (**)	%HR Inicial (***)
1	6,31	5,37	4,45
2	6,35	6,15	4,31
3	5,13	5,15	4,82
4	6,39	5,53	4,23
5	6,04	5,95	4,58
6	5,20	6,30	3,86
7	4,96	5,72	4,26
8	5,68	5,72	3,98
Promedio	5,76	5,74	4,31

La evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba de escotilla abierta a un 100% se muestra en la Figura 9. En esta se muestra la pérdida de masa de los granos, y el tiempo que tomaron en alcanzar una estabilización en las mediciones.

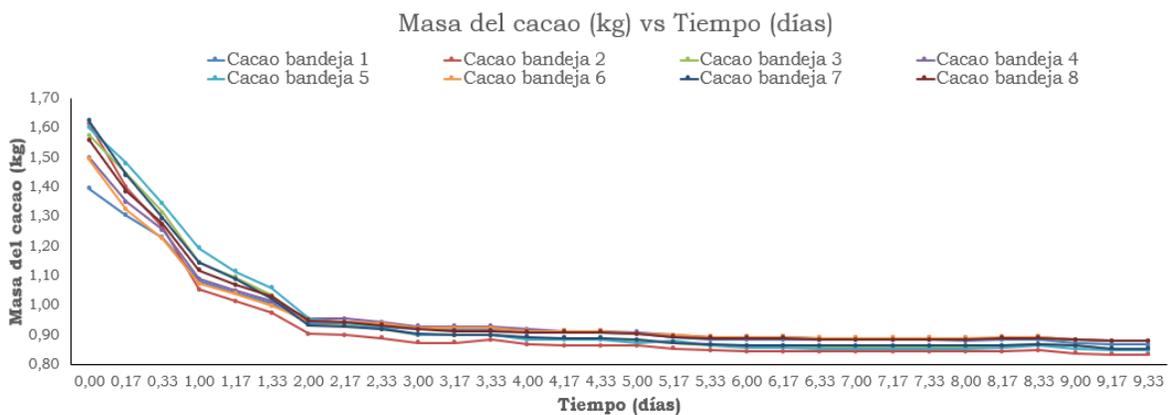


Figura 9. Evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba de escotilla abierta a un 100%.

La figura 10 muestra el nivel de humedad interna en la cámara de secado durante la prueba de escotilla abierta a un 100%.

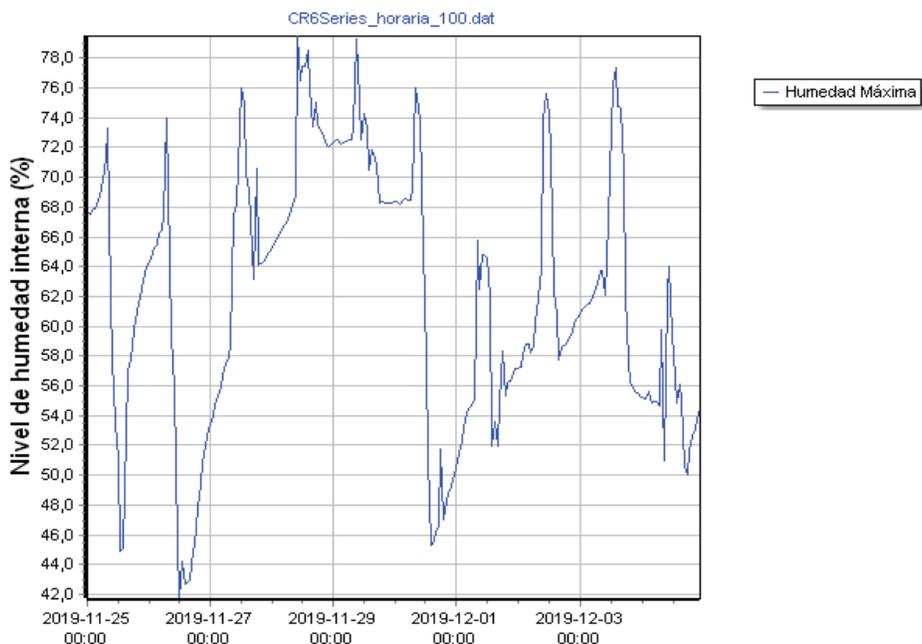


Figura 10. Nivel de humedad interna versus el tiempo de secado a un 100% de apertura de la escotilla.

La figura 11 muestra la temperatura interna en la cámara de secado durante la prueba de escotilla abierta a un 100%.

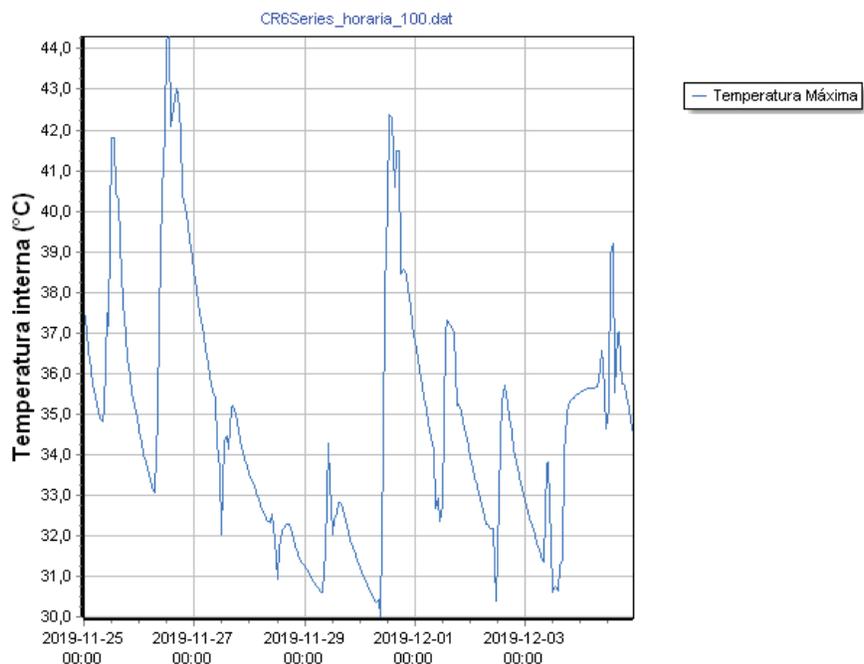


Figura 11. Temperatura interna versus el tiempo de secado a un 100% de apertura de la escotilla.

La evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba de escotilla abierta a un 50% se muestra en la figura 12. En esta se muestra la pérdida de masa de los granos, y el tiempo que tomaron en alcanzar una estabilización en las mediciones.

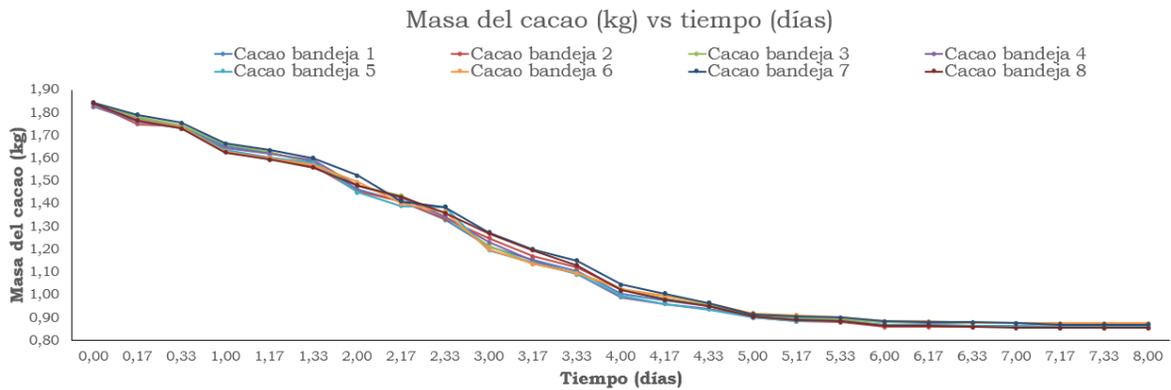


Figura 12. Evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba de escotilla abierta a un 50%.

La figura 13 muestra el nivel de humedad interna en la cámara de secado durante la prueba de escotilla abierta a un 50%.

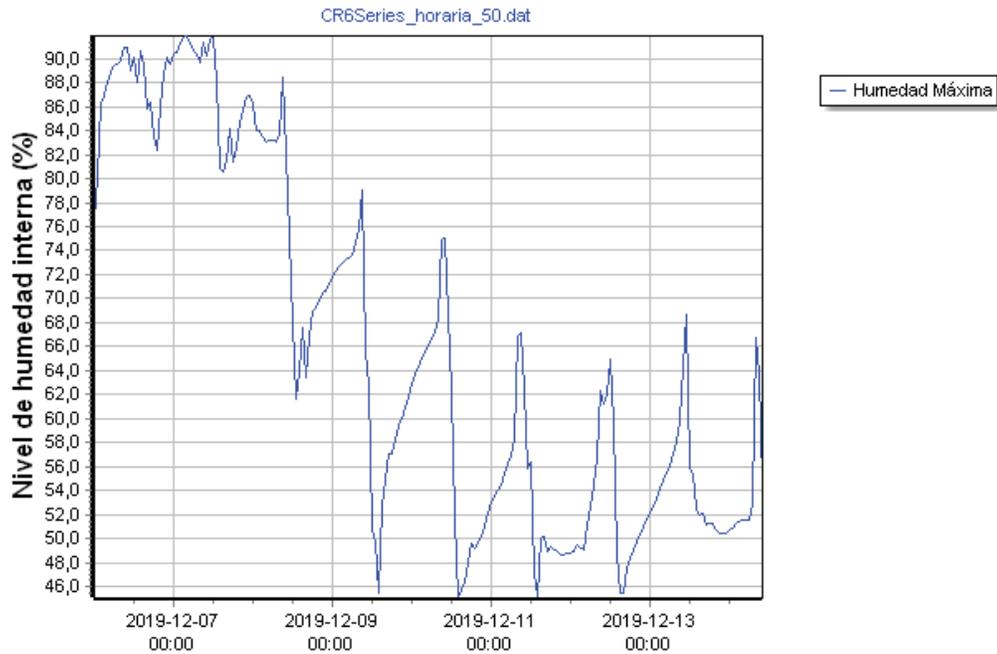


Figura 13. Nivel de humedad interna versus el tiempo de secado a un 50% de apertura de la escotilla.

La figura 14 muestra la temperatura interna en la cámara de secado durante la prueba de escotilla abierta a un 50%.

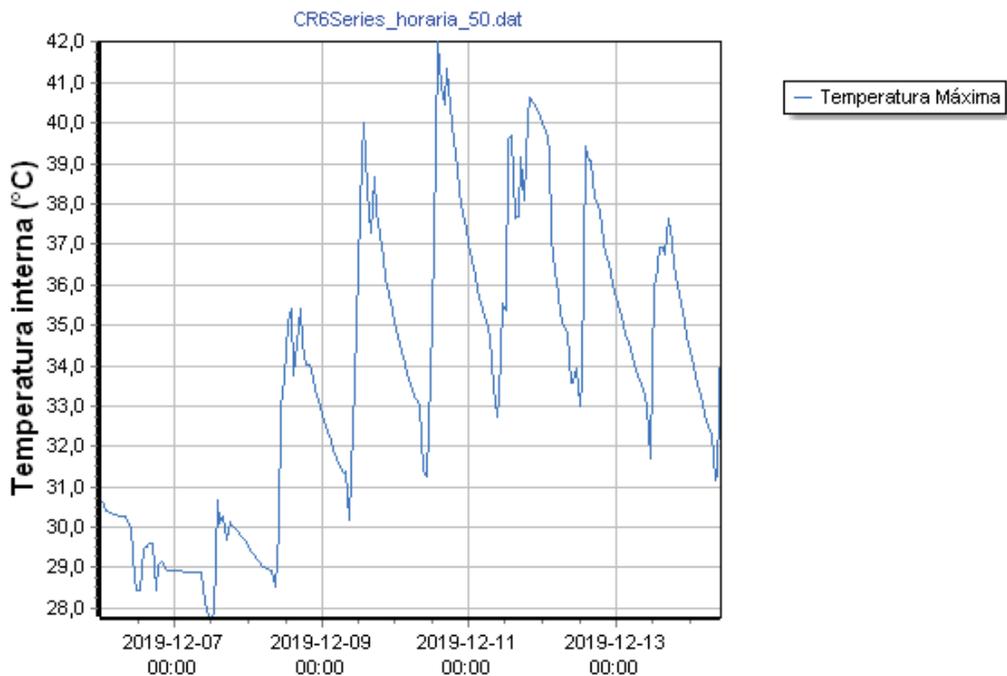


Figura 14. Temperatura interna versus el tiempo de secado a un 50% de apertura de la escotilla.

La evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba de escotilla abierta a un 25% se muestra en la Figura 15. En esta se muestra la pérdida de masa de los granos, y el tiempo que tomaron en alcanzar una estabilización en las mediciones.

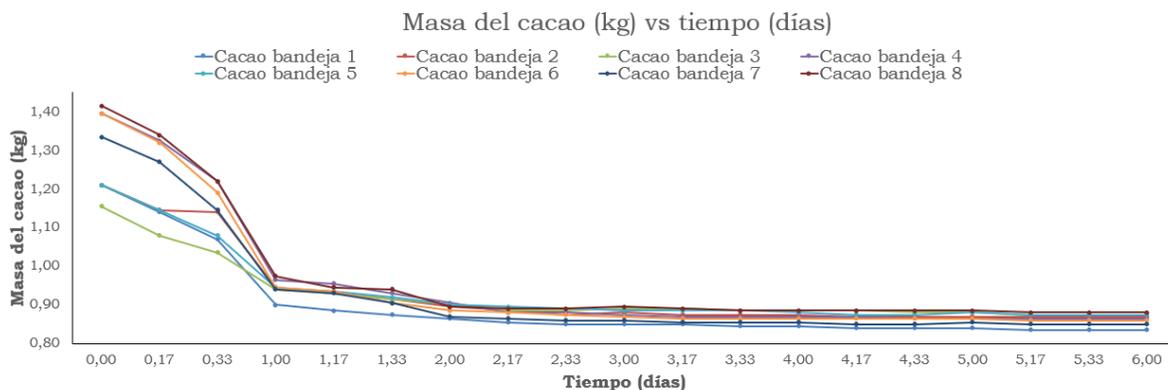


Figura 15. Evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba de escotilla abierta a un 25%.

Las figuras 16 y 17 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y temperatura en el interior de la cámara de secado durante la prueba de escotilla abierta a un 25%.

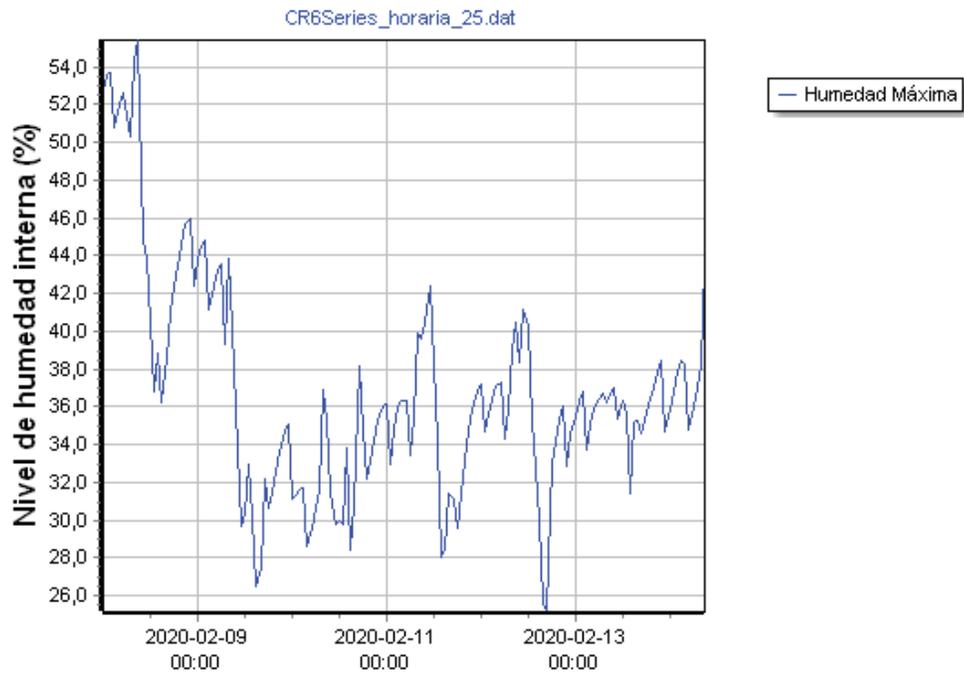


Figura 16. Nivel de humedad interna versus el tiempo de secado a un 25% de apertura de la escotilla.

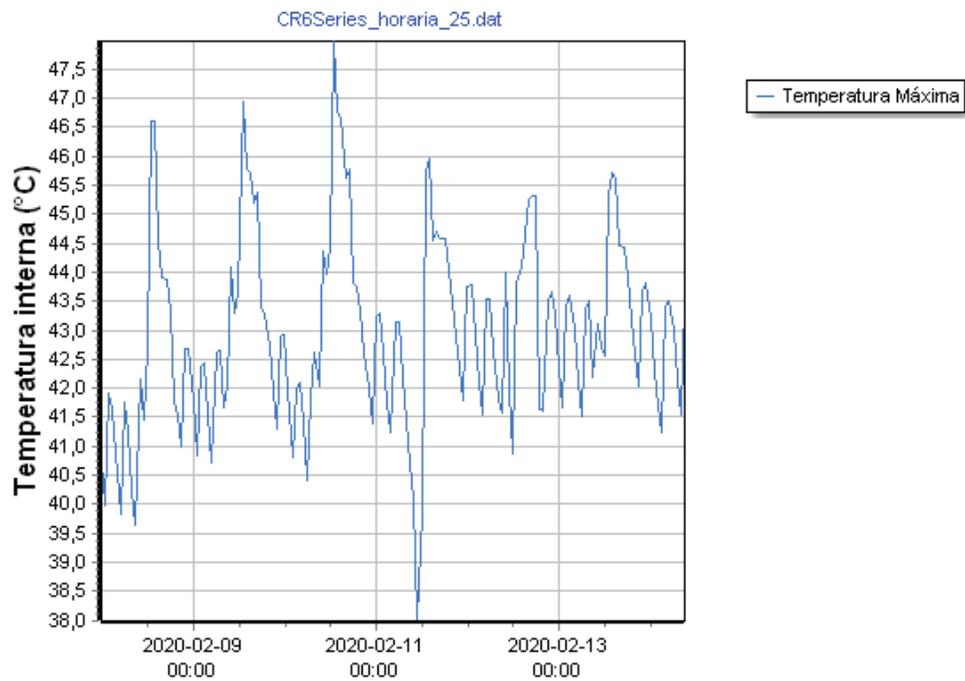


Figura 17. Temperatura interna versus el tiempo de secado a un 25% de apertura de la escotilla.

Resultados con el sistema electrónico implementado

En los siguientes apartados se mostrarán los gráficos de medida de “Masa del cacao” (kg) vs “Tiempo” (días), así como las gráficas de medidas de humedad y temperatura dentro del secador durante el tiempo de cada prueba, además en esta sección se mostrará los datos de humedad y temperatura exterior, obtenidos del muestreo del sensor RHP-2R11. También se mostrarán las tablas que indican la humedad inicial y final en los granos de cacao.

En el cuadro 3 se tabula la humedad inicial promedio de los granos de cacao para la prueba final 1, prueba final 2 y prueba final 3.

Cuadro 3. Contenido de humedad inicial promedio de los granos de cacao para la prueba final 1, prueba final 2 y prueba final 3.

# de Bandeja	%HR Inicial (*)	%HR Inicial (**)	%HR Inicial (***)
3	49,24	-	-
6	48,91	-	-
1	47,96	-	-
2	-	40,11	-
8	-	45,4	-
5	-	42,93	-
4	-	-	47,53
6	-	-	48,96
3	-	-	46,61
Promedio	48,70	42,81	47,70

En el cuadro 4 se tabula la humedad alcanzada en los granos de cacao para la prueba final 1, prueba final 2 y prueba final 3.

Cuadro 4. Contenido de humedad alcanzado en los granos de cacao para la prueba final 1, prueba final 2 y prueba final 3.

# de Bandeja	%HR Inicial (*)	%HR Inicial (**)	%HR Inicial (***)
1	4,05	4,24	4,56
2	3,98	4,33	4,11
3	3,93	4,14	4,48
4	5,39	4,45	4,12
5	3,92	5,62	4,22
6	4,72	4,62	3,80
7	3,53	5,04	4,49
8	2,82	4,61	4,44
Promedio	4,04	4,63	4,28

La evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba final 1 se muestra en la figura 18. En esta se muestra la pérdida de masa de los granos, y el tiempo que tomaron en alcanzar una estabilización en las mediciones.

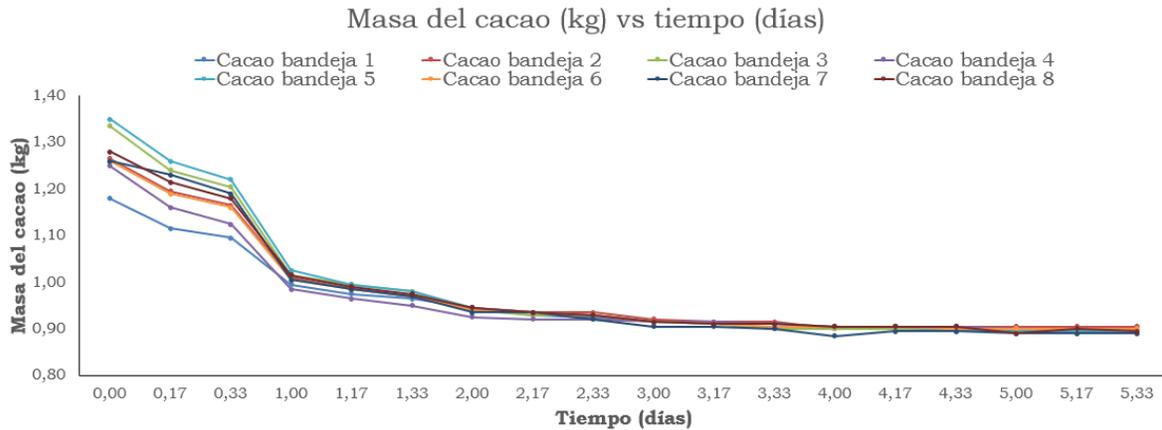


Figura 18. Evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba final 1.

Las figuras 19 y 20 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y la temperatura en el interior de la cámara de secado durante la prueba final 1.

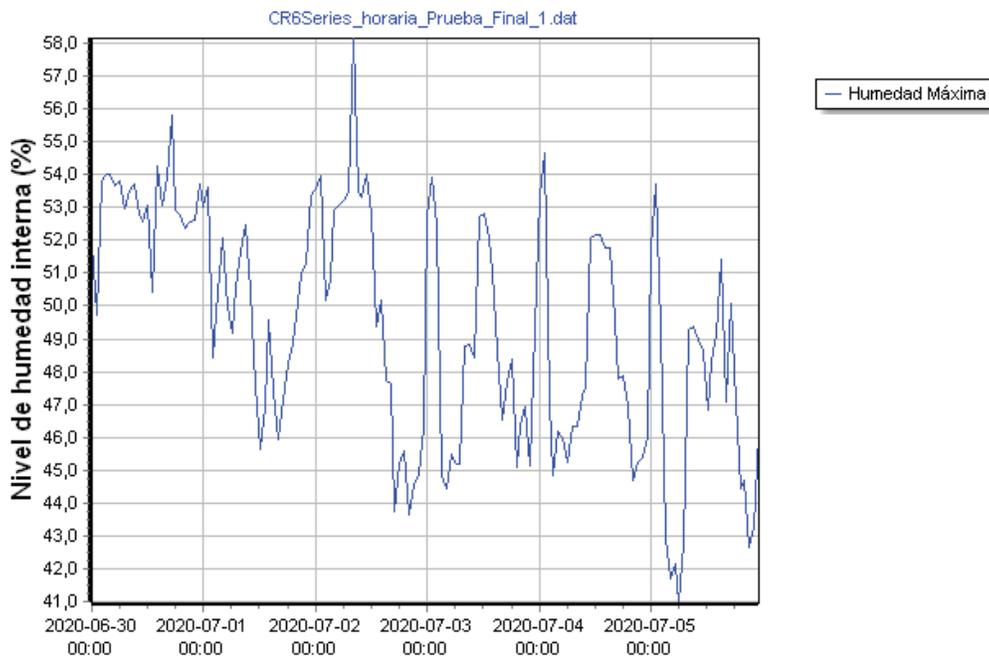


Figura 19. Nivel de humedad interna versus el tiempo de secado de la prueba final 1.

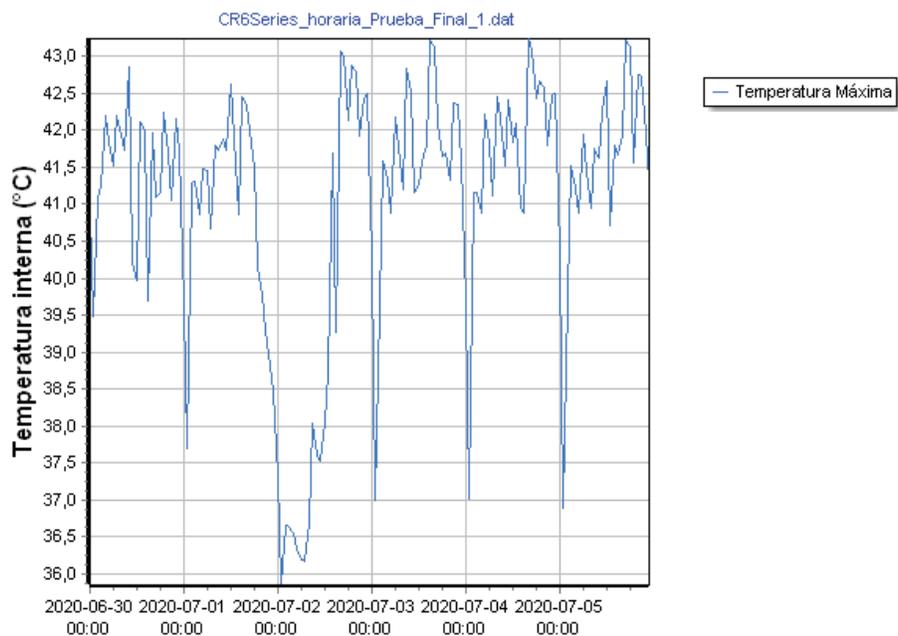


Figura 20. Temperatura interna versus el tiempo de secado de la prueba final 1.

Las figuras 21 y 22 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y la temperatura externa durante la prueba final 1.

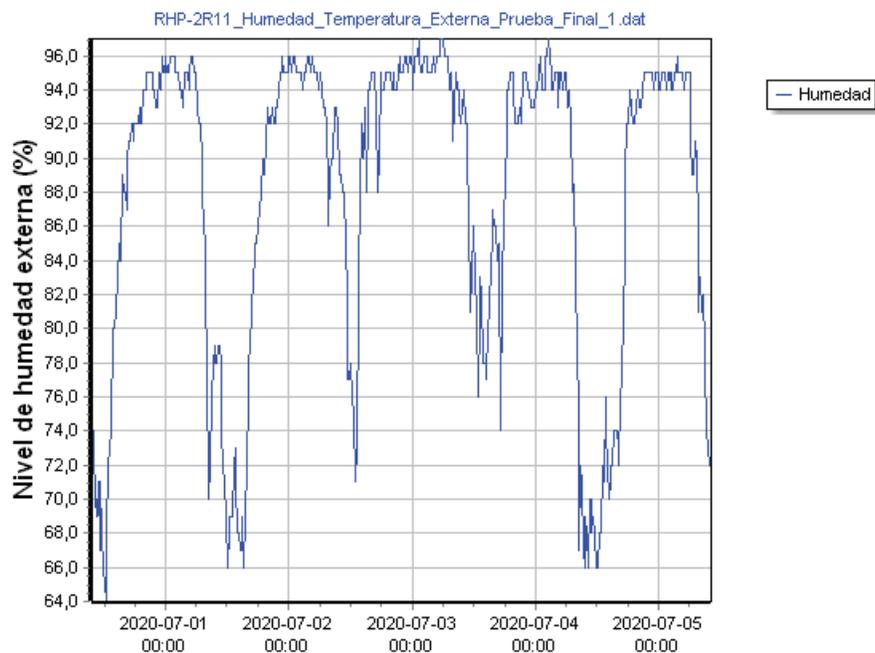


Figura 21. Nivel de humedad externa versus el tiempo de secado de la prueba final 1.

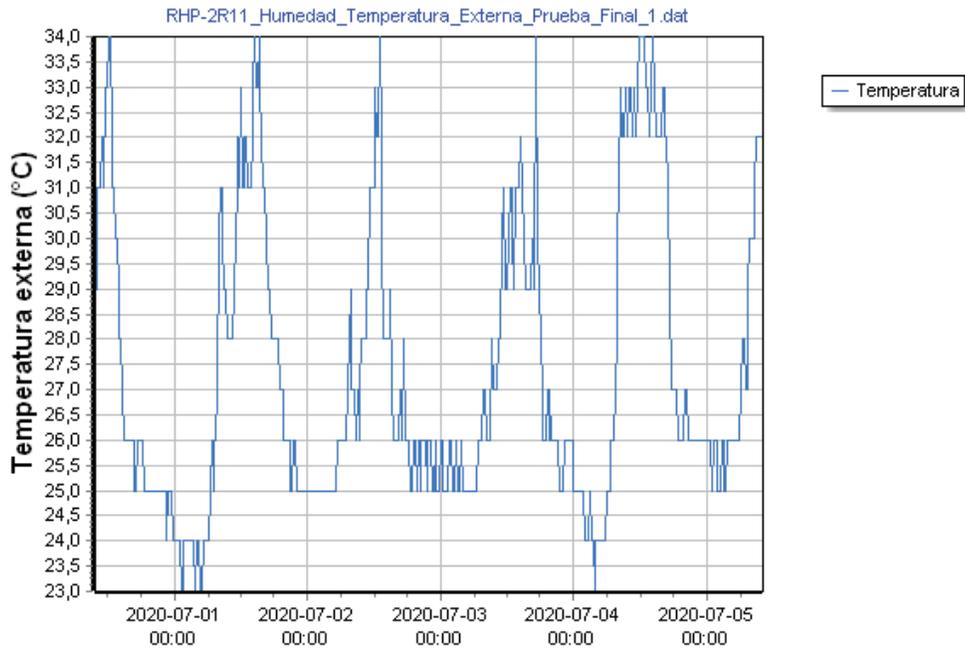


Figura 22. Temperatura externa versus el tiempo de secado de la prueba final 1.

La evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba final 2 se muestra en la figura 23. En esta se muestra la pérdida de masa de los granos, y el tiempo que tomaron en alcanzar una estabilización en las mediciones.

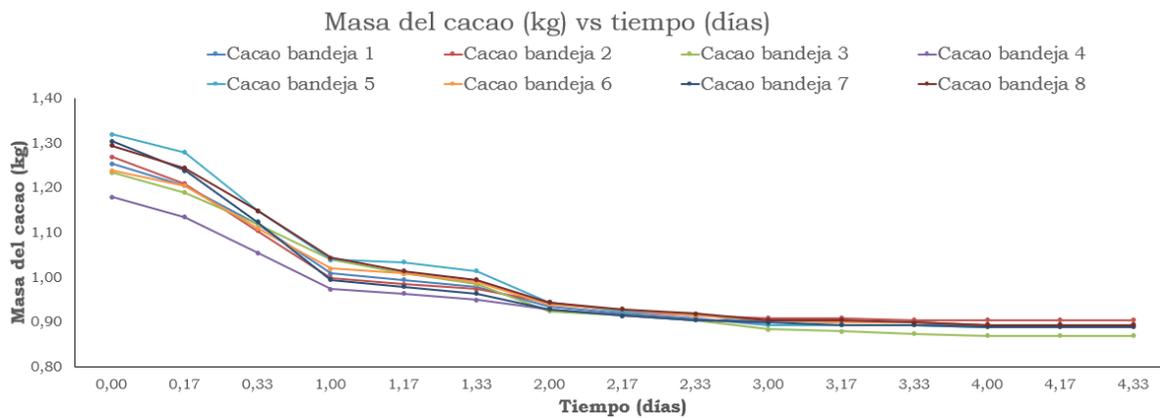


Figura 23. Evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba final 2.

Las figuras 24 y 25 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y la temperatura en el interior de la cámara de secado durante la prueba final 2. Por otra parte, las figuras 26 y 27 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y la temperatura externa durante la prueba final 2.

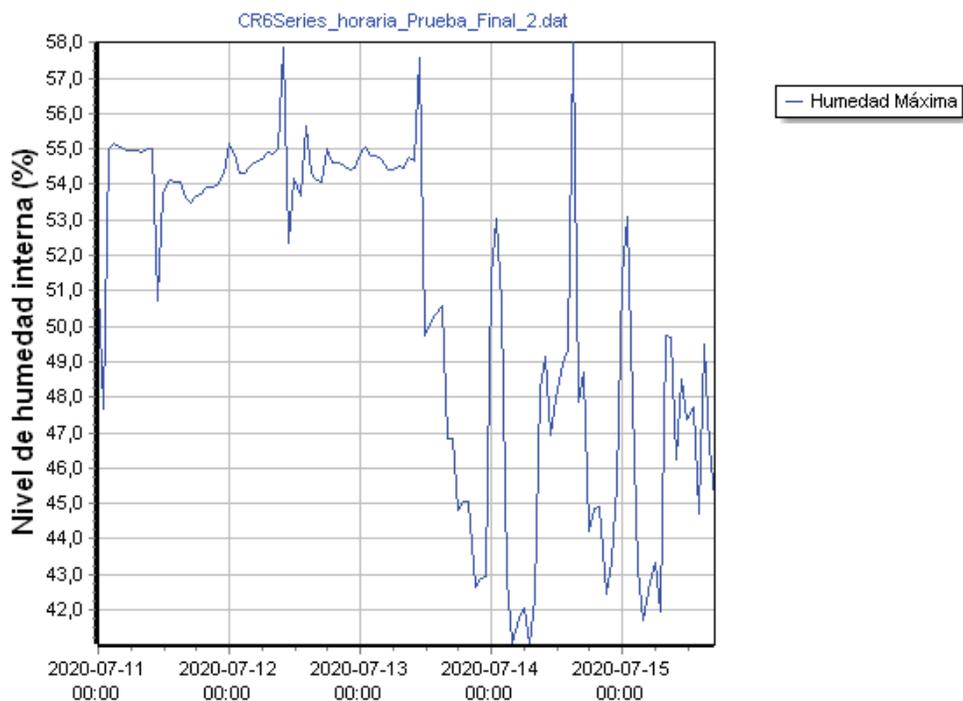


Figura 24. Nivel de humedad interna versus el tiempo de secado de la prueba final 2.

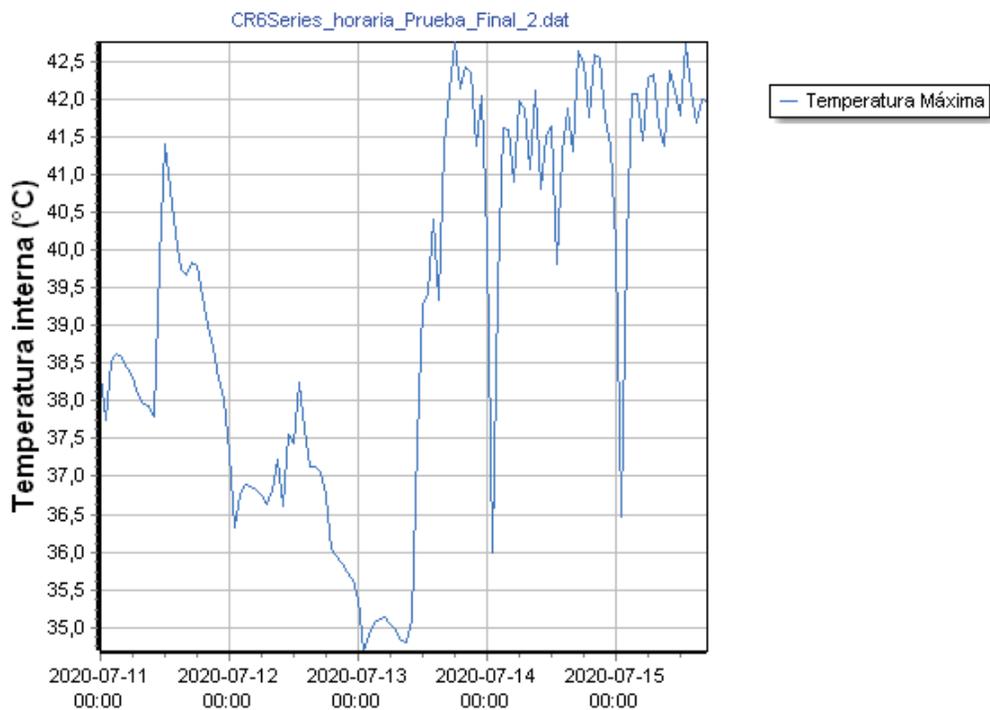


Figura 25. Temperatura interna versus el tiempo de secado de la prueba final 2.

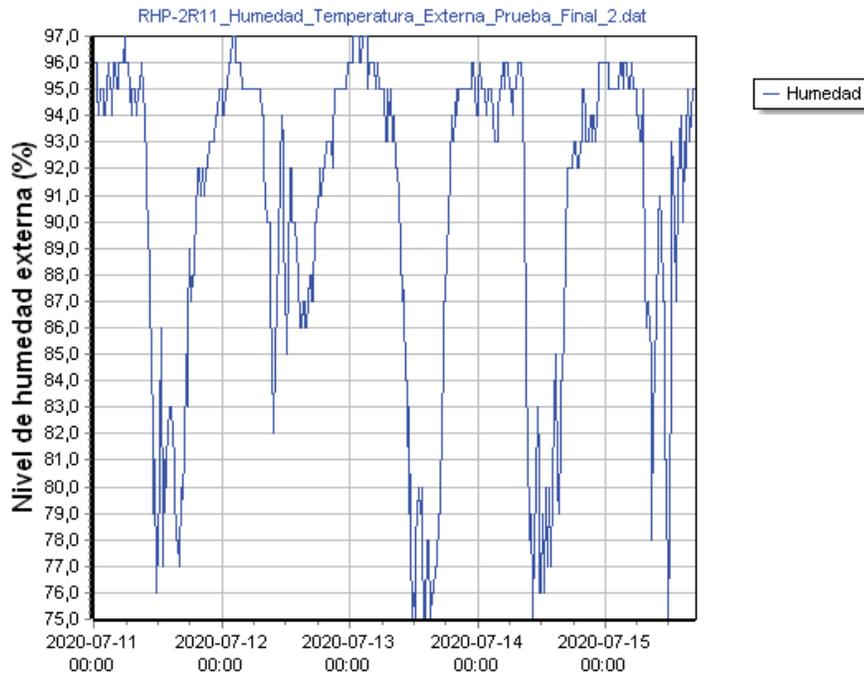


Figura 26. Nivel de humedad externa versus el tiempo de secado de la prueba final 2.

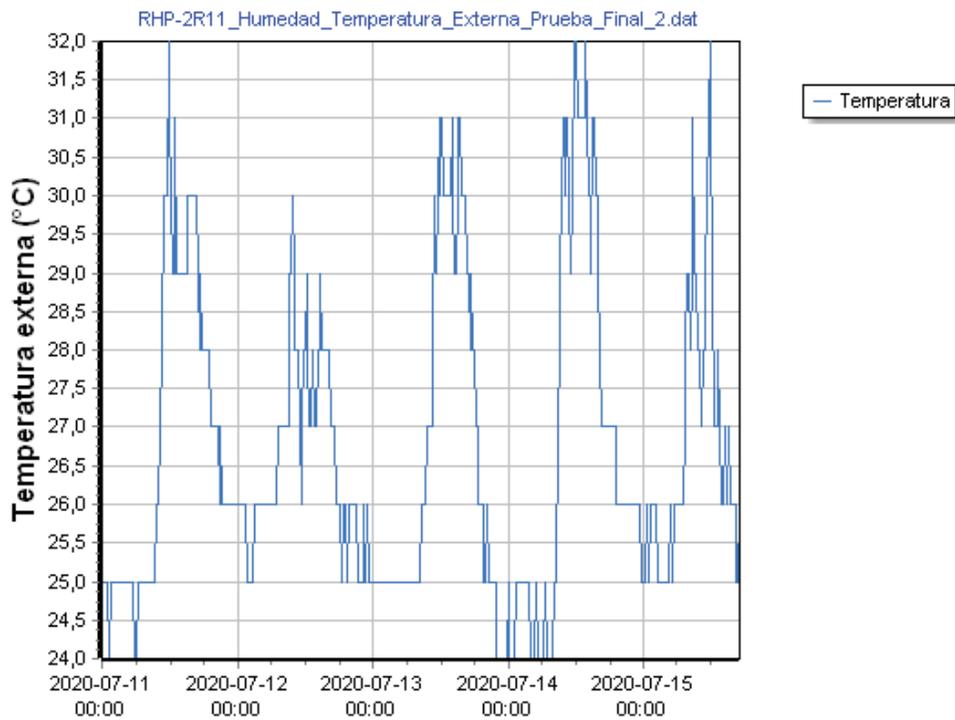


Figura 27. Temperatura externa versus el tiempo de secado de la prueba final 2.

La evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba final 3 se muestra en la figura 28. En esta se muestra la pérdida de masa de los granos, y el tiempo que tomaron en alcanzar una estabilización en las mediciones.

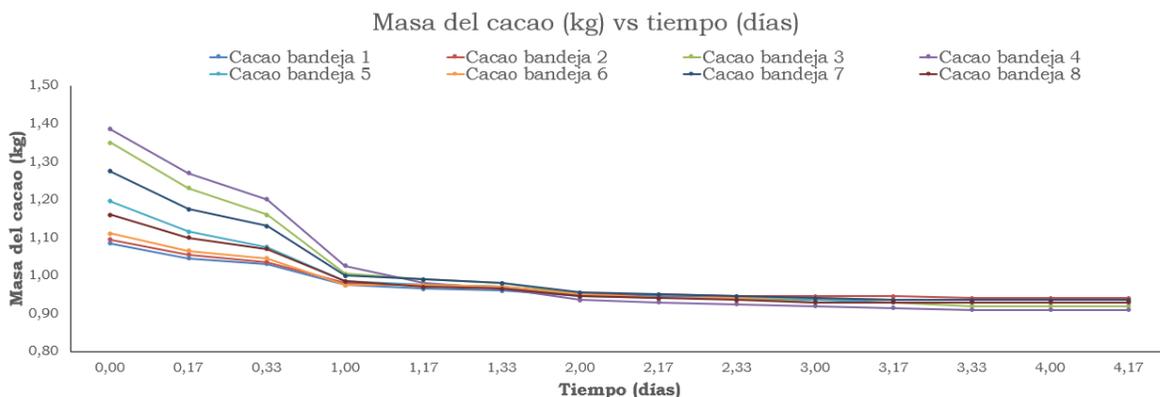


Figura 28. Evolución del proceso de secado de los granos de cacao para la prueba final 3.

Las figuras 29 y 30 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y la temperatura en el interior de la cámara de secado durante la prueba final 3. Por otra parte, las figuras 31 y 32 muestran, respectivamente, el nivel de humedad y la temperatura externa durante la prueba final 3.

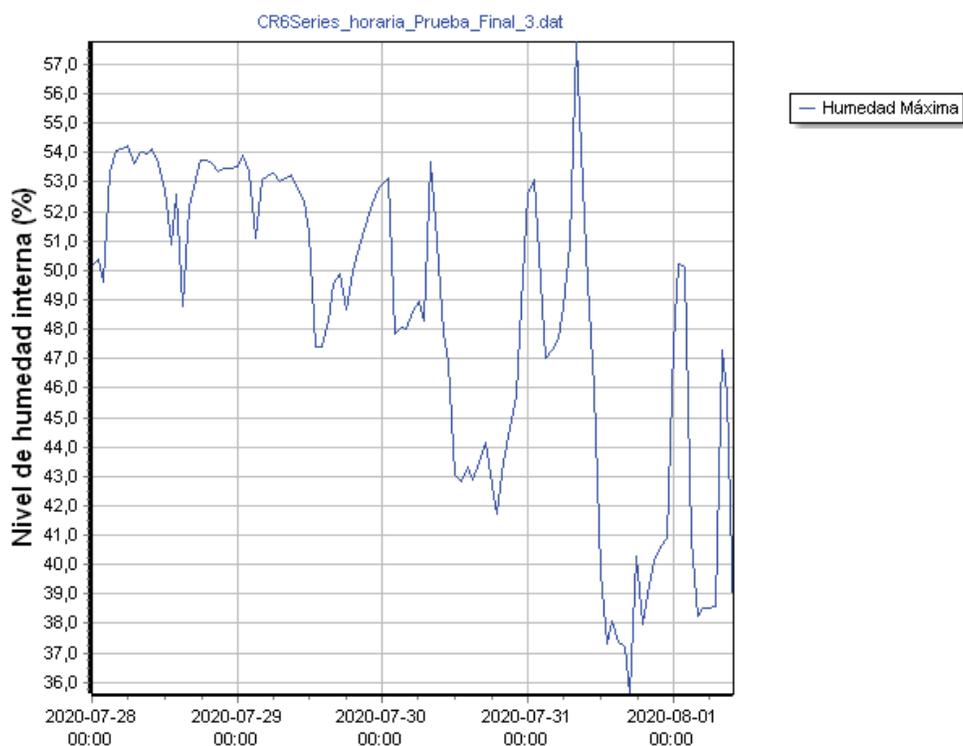


Figura 29. Nivel de humedad interna versus el tiempo de secado de la prueba final 3.

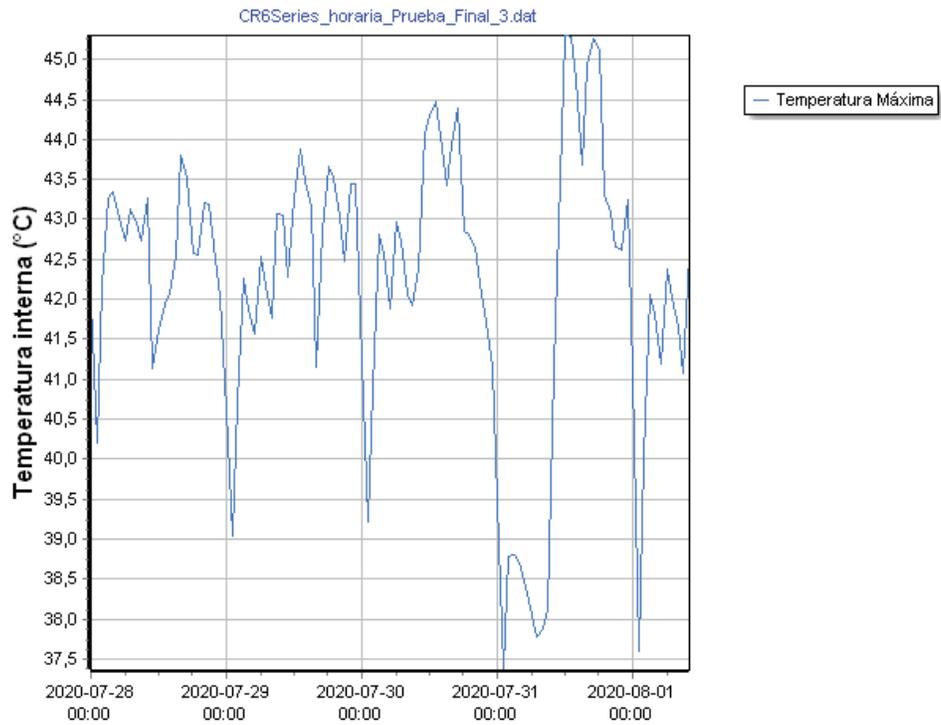


Figura 30. Temperatura interna versus el tiempo de secado de la prueba final 3.

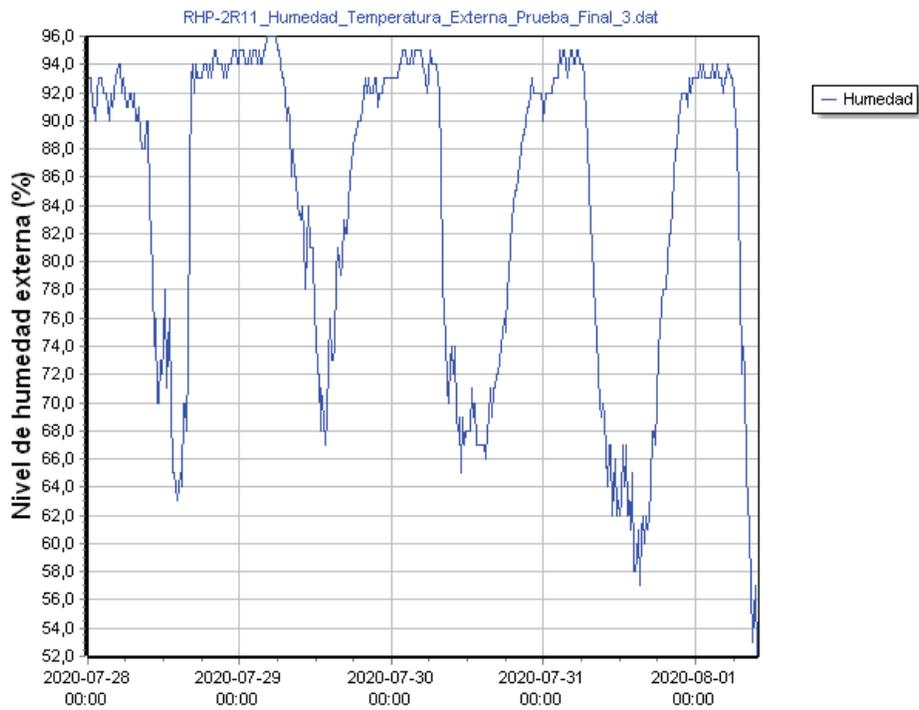


Figura 31. Nivel de humedad externa versus el tiempo de secado de la prueba final 3.

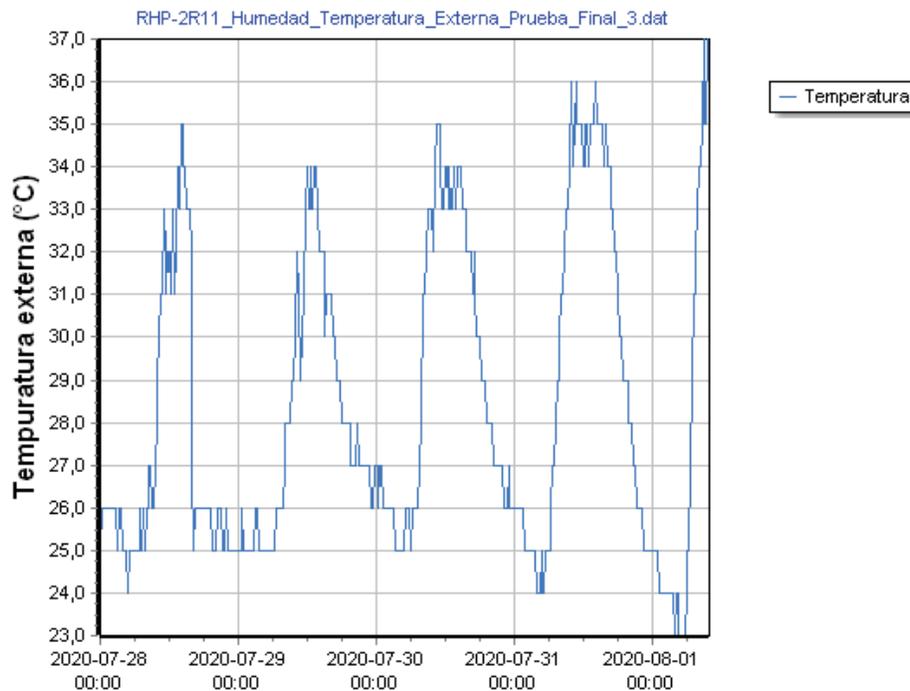


Figura 32. Temperatura externa versus el tiempo de secado de la prueba final 3.

Conclusiones y/o recomendaciones

- Mediante el empleo del sistema automatizado de control se produjo una mejora en los tiempos de secado y se llegaron a niveles de contenido de humedad en los granos de cacao aceptados por la industria.
- El sistema tuvo la respuesta esperada ante condiciones atmosféricas propias de la estación lluviosa en San Clara de San Carlos. Manteniendo el interior de la cámara de secado cercano a un 50% de humedad relativa, a pesar de que el exterior estuviera a niveles superiores del 90%.
- Las pantallas implementadas permiten desplegar los valores de humedad y temperatura, externa e interna, así como el estado de los actuadores, de forma ordenada y legible, permitiendo una rápida interpretación de los datos.
- El sistema de monitorización desarrollado es una herramienta clave para la atención y mantenimiento del sistema de temperatura, debido a que se puede interpretar que existe un fallo cuando no se está llegando a la temperatura programada.

Referencias

- [1] G. Enriquez, Fundamentos de Control de Motores Electricos en la Industria, Lima: Editorial Limusa, 2005.
- [2] Organización de Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «Secado de granos,» 20 05 2019. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/x5058s/x5058S02.htm>.
- [3] Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), «Manual de buenas prácticas de manufactura en el beneficio La Cabaña,» Programa de fomento de la producción agropecuaria sostenible, San José, 2010.
- [4] Y. Blanco, H. Duranona y R. Acosta, «Efecto de la temperatura y humedad en la conservación de granos en silos metálicos refrigerados,» *SciELO*, pp. 105-114, 2016.
- [5] DOCINADE, «DOCINADE: Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo,» 21 Mayo 2019. [En línea]. Available: <http://docinade.com/?p=1>.

Comunidades de macroinvertebrados bentónicos como bioindicador de calidad de agua en un sector del río Chotano, Perú

Benthic macroinvertebrates community as quality bioindicator of water in a sector of the Chotano river, Perú

Celso Nazario Purihuamán-Leonardo¹, Eberth Frank Sánchez-Bustamante²

Fecha de recepción: 11 de mayo de 2021
Fecha de aprobación: 30 de agosto de 2021

Purihuamán-Leonardo, C.N; Sánchez-Bustamante, E.F. Comunidades de macroinvertebrados bentónicos como bioindicador de calidad de agua en un sector del río Chotano, Perú. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 117-127.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5662>

- 1 Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Cesar Vallejo, Chiclayo, Perú. Correo electrónico: ingcelsop@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-1270-0402>
- 2 Dirección Sub Regional de Salud – Chota, Perú. Correo electrónico: blgosanchez@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5108-2566>

Palabras clave

Contaminación orgánica; macroinvertebrados bentónicos; calidad del agua; biodiversidad.

Resumen

Se establecieron dos estaciones en un sector del río Chotano, con el objetivo de evaluar la calidad del agua, empleando macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores, para lo cual se utilizaron índices biológicos: IBMWP, ETP %, diversidad, riqueza, equidad, dominancia, la densidad y grupos tróficos. La recolección de los macroinvertebrados se realizó empleando la red tipo Surber, en dos períodos (seco y lluvioso). En la estación 1 se colectaron en promedio 710 ind/m² distribuidos en 23 taxones de los órdenes díptera, efemeróptera y tricóptera y en la estación 2 se colectaron 16790 ind/m², con 6 taxones de los órdenes haplotaxida y díptera, siendo las especies indicadores de polución orgánica, *Chironomus sp*, *Tubifex sp* y *Psychoda sp*, presentes mayormente en la estación 2. Los índices promedios más altos en la estación 1 a comparación de la estación 2 fueron, IBMWP con 60 puntos indicador de calidad de agua dudosa, moderadamente contaminada y 11 puntos, indicador de calidad muy crítica fuertemente contaminada, la diversidad de Shannon – Wiener 1,33 y 0,30 indicador de aguas con poca diversidad, la equidad de Pielou 0,50 muestran poblaciones más estables y 0,20 menos estables; los índices más bajos en la estación 1 comparando con la estación 2 fueron, dominancia de Simpson 0,37 indicador de poca dominancia y mayor diversidad y 0,9 indicador de mayor dominancia, menor diversidad y mayor polución orgánica.

Keywords

Organic pollution; benthic macroinvertebrates; water quality; biodiversity.

Abstract

Two stations were established in a sector of the Chotano river, with the objective of evaluating the quality of the water, using benthic macroinvertebrates as bioindicators, for which biological indices were used: IBMWP, ETP %, diversity, richness, equity, dominance, density and trophic groups. The collection of macroinvertebrates was carried out using the Surber sampler, in two periods (dry and rainy). In the first season, an average of 710 ind/m² were collected, classified in 23 taxa of the orders diptera, ephemeroptera and tricoptera, and in the second season 16790 ind/m² were collected, with 6 taxa of the orders haplotaxide and diptera, the species indicating organic pollution, *Chironomus sp*, *Tubbier sp* and *Psychoda sp*, present mostly in season 2. The highest average indices in season 1 compared to season 2 were IBMWP with 60 points indicating moderately polluted doubtful water quality and 11 points indicating highly polluted critical quality, the diversity of Shannon - Wiener 1,33 and 0,30 indicating waters with limited diversity, the equity of Pielou 0,50 show more stable and 0,20 less stable populations; the lowest indices in station 1 compared to season 2 were, Simpson dominance 0,37 indicator of low dominance and higher diversity and 0,9 indicator of higher dominance, lower diversity and higher organic pollution.

Introducción

El estudio biológico y ecológico de las aguas continentales o biomonitorio basado en la estructura de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos especialmente los que presentan sensibilidad o tolerancia a determinadas condiciones ambientales; es uno de los métodos más eficaces para evaluar los cambios ambientales como: Las características fisicoquímicas de la

calidad de las aguas continentales, el tipo de flora y fauna a ellas asociadas, permitiendo así, conocer el estado de eutroficación de un cuerpo de agua, su potabilidad para el consumo humano y animal, su grado de aceptabilidad para irrigación, usos industriales, piscicultura y actividades humanas relacionadas con el campo hídrico [1], [2], [3], [4]. Los ecosistemas acuáticos continentales en las últimas décadas han sufrido más impactos por la actividad humana. Los desechos industriales y domésticos de una población cada vez más creciente, tienen como destino final los ríos, y en último término el mar; afectando a los organismos bentónicos por el cambio en la composición natural de los sistemas acuáticos de muchos ríos del mundo, estos han desaparecido, o se han visto sustancialmente reducida o aumentado su población [6], [7]. Los macroinvertebrados presentan sensibilidad o tolerancia a determinadas condiciones ambientales y cumplen importantes funciones en la transformación de la materia orgánica fina y gruesa compuesta por hojas caídas y restos de animales, siendo un componente fundamental en la dinámica y funcionamiento del río como indicadores de calidad del agua; desarrollando modificaciones morfológicas y fisiológicas para su adaptación en el hábitat, como son las estrategias alimenticias, las cuales, se organizan en grupos funcionales [9], [10]. Existen cinco grupos funcionales alimenticios principales: los trituradores, que se alimentan de materia orgánica particulada gruesa (MOPG); los colectores-recolectores; colectores filtradores, de materia orgánica particulada fina (MOPF) y los raspadores de biopelícula y depredadores, que consumen otros animales. En quebradas de montaña, se observa variedad de oferta alimenticia, que se relaciona con la presencia de ciertos grupos funcionales; destacando los raspadores y colectores-recolectores [11].

El río Chotano no es ajeno a esta realidad y está siendo impactado con aguas residuales del camal municipal y red de alcantarillado domésticas que son arrojadas sin ningún tipo de tratamiento a la quebrada Colpamayo, tributario de dicho río y en algunos casos al mismo río; debido a ello, la investigación tiene como propósito evaluar la calidad del agua mediante la identificación de las diversas especies de macroinvertebrados que allí habitan.

Materiales y métodos

Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicado en un sector del río Chotano entre los 06°34,220' latitud S y 78° 39,113' longitud O a una altitud de 2301 m.s.n.m., estación 1 y a los 6° 34,145' latitud S y 78° 39,188' longitud O a una altitud de 2301 m.s.n.m., estación 2. El afluente, quebrada Colpamayo tributario del río Chotano, desemboca a los 6° 34,181' latitud S y 78° 39,155' longitud O a una altitud de 2301 m.s.n.m., zona 17 hemisferio sur, como se aprecia en la figura 1.

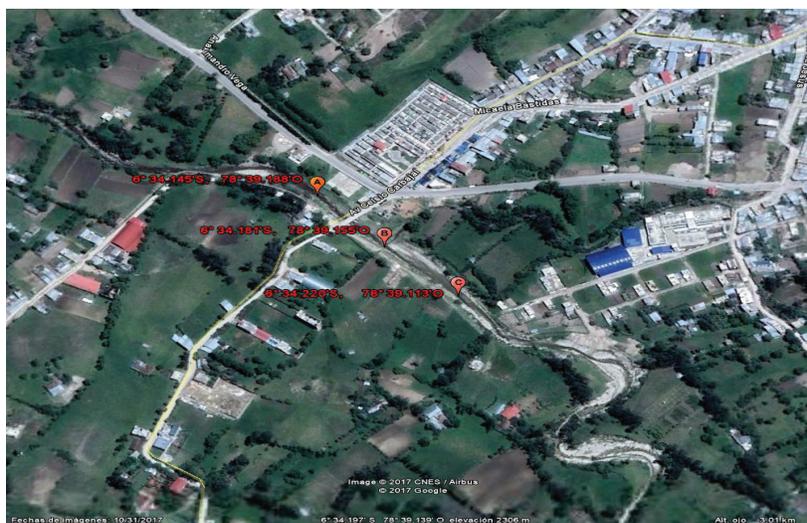


Figura 1. Ubicación de la estación 1 y 2, sector del río Chotano.

Recolección de macroinvertebrados

Los muestreos se desarrollaron en ambas estaciones del río Chotano, ubicados a una distancia de 100 m cada una, correspondientes a época seca y comienzos de lluvias. Se determinaron puntos específicos cada 10 m. extrayéndose cuatro muestras por punto, dos a las orillas y dos en la parte media del río, por cada estación se tomaron 40 muestras, la captura de los macroinvertebrados se realizó según la guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquía [1] y el método de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas [12], utilizando la red Surber para muestras cuantitativas con una superficie básica de 0,034 m², malla de 500 µm con un marco de 337,5 cm². Las muestras fueron colectadas en envases PET para ser llevadas a los ambientes del Laboratorio de análisis de la calidad de agua para consumo humano de la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental de la ciudad de Chota, donde se depositaron en una bandeja de porcelana, el sustrato se movió con cuidado para realizar la colecta, colocándose en una placa Petri y con ayuda de una pinza entomológica se colocaron en el estereoscopio marca Kyowa optical modelo SD-2PL usando los objetivos de 15 X/15 y 10X/23 por 4X para su observación y determinación taxonómica de los especímenes según género y/o morfotipo [1], [14].

Análisis de los datos hallados

Con los grupos analizados de los macroinvertebrados a través de órdenes, familias, o géneros para evaluar la calidad del agua, se calculó el índice biótico IBMWP “Biological Monitoring Working Party” modificado y adaptado para el río Chotano [1], [15], además se calculó el índice de riqueza total de EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera).

Las pruebas estadísticas determinaron una distribución normal, por lo que se realizaron pruebas paramétricas para los índices de diversidad de Shannon – Wiener, la riqueza de Margalef (Dmg), la equidad de Pielou, la dominancia de Berger – Parker, y la dominancia de Simpson (λ), además se determinó la Densidad en ind /m². El análisis de los grupos tróficos se realizó mediante la prueba Chi-cuadrado para muestras independientes, con un nivel de significancia de 0,05

Resultados

Cuadro 1. Taxonomía, categoría y tolerancia de los macroinvertebrados bentónicos colectados en la estación 1.

Filum	Clase	Orden	Familia	Género y Especie	Estación 1 (organismo/m ²)						Categorías tróficas	Tolerancia a la polución	
					M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	Promedio	Porcentaje (%)			
Artrópoda	Insecta	Efemeróptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius kondratieffi</i>	112	38	172	540	216	30,4	Colector-raspador	Tolerante	
				<i>Baetis tricaudata</i>	57	19	86	269	108	15,2	Colector-raspador	Tolerante	
			Tricorythidae	<i>Tricorythodes sp</i>	38	28	8	14	22	3,1	Colector-fragmentador	Tolerante	
		Diptera	Psychodidae	<i>Psychoda sp</i>							0,0	Colectores-detritivo	Resistente
			Syrphidae	<i>Eristalis tenax</i>							0,0	Colectores-detritivo	Resistente
			Simuliidae	<i>Simulium sp</i>	187	62	46	108	101	14,2	Colector-filtrador	Tolerante	
			Tipulidae	<i>Tipula sp</i>	1	0	1	0	1	0,1	Colector-fragmentador	Tolerante	
			Ceratopogonidae	<i>Probezzia sp</i>	0	0	0	2	1	0,1	N.I	Tolerante	
			Muscidae	<i>Limnophora sp</i>	0	12	2	8	6	0,8	Colector-detritivos	Tolerante	
										0,0	Colector-detritivos	Resistente	
			Culicidae	<i>Culex sp</i>	18	15	5	8	12	1,7	Colector-filtrador	Resistente	
			Chironomidae	<i>Chironomus sp (b)</i>	9	138	43	65	64	9,0	Colector-detritivos	Resistente	
				<i>Chironomus sp (r)</i>	62	71	237	146	129	18,1	Colector-detritivos	Resistente	
				<i>Chironomus sp (vm)</i>	8	34	11	0	13	1,8	Colector-detritivos	Resistente	
			Coleóptera	Dytiscidae	<i>Dytiscus marginalis</i>	1	0	1	0	1	0,1	Depredador	Tolerante
				Elmidae	<i>Stenelmis sp</i>	0	0	1	2	1	0,1	Colector-fragmentador	Tolerante
		<i>Macrelmis sp</i>			0	1	0	3	1	0,1	Colector-fragmentador	Tolerante	
		Megalóptera	Corydalidae	<i>Corydalus sp</i>	0	0	1	2	1	0,1	Depredador	Tolerante	
		Tricóptera	Hydroptilidae	<i>Hidroptila sp</i>	42	3	0	5	13	1,8	Colectores-raspadores	Tolerante	
			Hydropsychidae	<i>Smicridea sp</i>	0	0	3	2	1	0,1	Fragmentador	Tolerante	
			Hydrobiosidae	<i>Atopsyche sp</i>	0	0	0	1	1	0,1	Depredador	Tolerante	
			Polycentropodidae	<i>Polycentropus sp</i>	0	5	19	11	9	1,3	Depredador	Tolerante	
			Philopotamidae	<i>Chimarrhodella sp</i>	0	1	0	0	1	0,1	N.I	Tolerante	
Mollusca	Gastropoda	Hygrophila	Physidae	<i>Physa acuta</i>	0	0	4	8	3	0,4	Colectores-raspadores	Resistente	
Annelida	Oligochaeta	Haplotaxida	Lumbricidae	<i>Eisenia foetida</i>	0	0	2	0	1	0,1	Colectores-Detritivos	Resistente	
			Tubificidae	<i>Tubifex sp</i>	0	0	17	3	5	0,7	Colectores-Detritivos	Resistente	
3	3	7	19	23	535	427	659	1197	711	100,0	26	26	

Cuadro 2. Taxonomía, categoría y tolerancia de los macroinvertebrados bentónicos colectados en la estación 2.

Filum	Clase	Orden	Familia	Género y Especie	Estación 2 (organismo/m ²)						Categorías tróficas	Tolerancia a la polución	
					M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	Promedio	Porcentaje (%)			
Artrópoda	Insecta	Efemeróptera	Baetidae	<i>Camelobaetidius kondratieffi</i>							Colector-raspador	Tolerante	
				<i>Baetis tricaudata</i>							Colector-raspador	Tolerante	
			Tricorythidae	<i>Tricorythodes sp</i>							Colector-fragmentador	Tolerante	
		Díptera	Psychodidae	<i>Psychoda sp</i>	315	233	663	1335	637	4,0	Colectores-detritivoro	Resistente	
			Syrphidae	<i>Eristalis tenax</i>	111	53	138	377	170	1,1	Colectores-detritivoro	Resistente	
			Simuliidae	<i>Simulium sp</i>							Colector-filtrador	Tolerante	
			Tipulidae	<i>Tipula sp</i>							Colector-fragmentador	Tolerante	
			Ceratopogonidae	<i>Probezzia sp</i>							N.I	Tolerante	
			Muscidae	<i>Limnophora sp</i>								Colector-detritivoro	Tolerante
					90	0	74	222	97	0,6	Colector-detritivoro	Resistente	
			Culicidae	<i>Culex sp</i>							Colector-filtrador	Resistente	
			Chironomidae	<i>Chironomus sp (b)</i>								Colector-detritivoro	Resistente
				<i>Chironomus sp (r)</i>	273	173	115	173	184	1,2	Colector-detritivoro	Resistente	
		<i>Chironomus sp (vm)</i>									Colector-detritivoro	Resistente	
		Coleóptera	Dytiscidae	<i>Dytiscus marginalis</i>								Depredador	Tolerante
			Elmidae	<i>Stenelmis sp</i>								Colector-fragmentador	Tolerante
				<i>Macrelmis sp</i>								Colector-fragmentador	Tolerante
		Megalóptera	Corydalidae	<i>Corydalis sp</i>								Depredador	Tolerante
		Tricóptera	Hydroptilidae	<i>Hidroptila sp</i>								Colectores-raspadores	Tolerante
			Hydropsychidae	<i>Smicridea sp</i>								Fragmentador	Tolerante
Hydrobiosidae	<i>Atopsyche sp</i>									Depredador	Tolerante		
Polycentropodidae	<i>Polycentropus sp</i>									Depredador	Tolerante		
Philopotamidae	<i>Chimarrhodella sp</i>									N.I	Tolerante		
Mollusca	Gastropoda	Hygrophila	Physidae	<i>Physa acuta</i>							Colectores-raspadores	Resistente	
Annelida	Oligochaeta	Haplotaxida	Lumbricidae	<i>Eisenia foetida</i>	10	1	9	11	8	0,1	Colectores-Detritivoro	Resistente	
			Tubificidae	<i>Tubifex sp</i>	14288	13450	15721	16087	14887	93,1	Colectores-Detritivoro	Resistente	
3	3	7	19	23	15087	13910	16720	18205	15983	100	26	26	

Los cuadros 1 y 2 muestran las órdenes de macroinvertebrados encontrados en los distintos puntos muestreados en ambas estaciones; la estación 1, posee indicadores de aguas moderadamente contaminadas y bien oxigenadas [5], [13], siendo las más representativas, Díptera, Ephemeroptera y Tricoptera, pertenecientes a la clase insecta; los géneros más representativos de los macroinvertebrados bentónicos en esta estación, fueron: *Camelobaetidius* 30,4 %, *Chironomus sp* con un 28,9 %, *Baetis* 15,2 % y *Simulium* 14,2 %. *Camelobaetidius*, *Baetis* y *Simulium sp*, mientras que en los puntos muestreados de la estación 2, se registraron indicadores de aguas fuertemente contaminadas, con alta polución orgánica, siendo la más representativa, la presencia del orden díptera de la familia Chiromomidae; los géneros que destacan fueron: *Tubifex sp* con un 93 %, *Psichoda sp* 4 % y *Chironomus sp* 1 %, esto demuestra que zonas cercanas a poblaciones están siendo impactadas por la actividad humana a diferencia de las zonas altas que tienen menor contaminación [8].

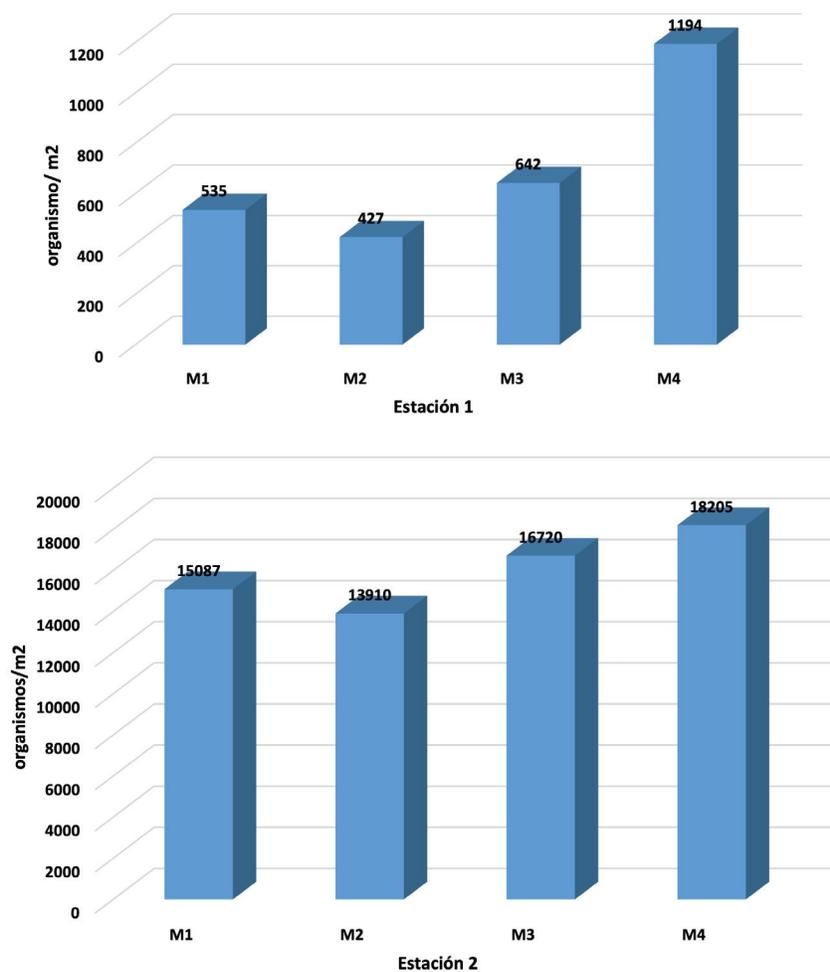


Figura 2. Macroinvertebrados bentónicos colectados en la estación 1 y 2.

En relación a los puntos de colecta de macroinvertebrados bentónicos en ambas estaciones (figura 2), se observa un ligero ascenso en los tres primeros muestreos y un elevado ascenso en el último muestreo, esto debido a que las muestras se realizaron en los períodos secos y lluvioso, la estación 1, muestra una calidad de agua moderadamente contaminada, según el Índice Biótico Grupo de Trabajo de Monitoreo Biológico «IBMWP», debido al orden y genero del microorganismo encontrado, con una variación de entre 427 a 1194 organismos/m². En la estación 2, se observa una variación de entre 13910 a 18205 organismos/m² colectados, determinantes de una calidad de agua promedio muy crítica y fuertemente contaminada.

Cuadro 3. Índices determinados de las familias de macroinvertebrados bentónicos en la estación 1 y 2.

	E1					E2				
	M1	M2	M3	M4	Promedio	M1	M2	M3	M4	Promedio
<i>BMWP</i>	36	57	70	76	59,75	11	9	11	11	10,50
<i>EPT</i>	46,50%	22%	43,70%	70,30%	45,6%	0%	0%	0%	0%	0%
<i>Diversidad Shannon - Wiener (H')</i>	1,54	1,38	1,33	1,08	1,33	0,28	0,18	0,28	0,48	0,31
<i>Riqueza de Margalef (Dmg)</i>	1,59	2,15	2,77	2,68	2,30	0,52	0,43	0,51	0,51	0,49
<i>Equidad de Pielou (J')</i>	0,64	0,54	0,46	0,37	0,50	0,16	0,11	0,16	0,27	0,18
<i>Dominancia de Berger-Parker (B)</i>	0,21	0,09	0,26	0,45	0,25	0,95	0,97	0,94	0,88	0,94
<i>Dominancia de Simpson (λ)</i>	0,26	0,37	0,35	0,5	0,37	0,9	0,94	0,89	0,79	0,88

A partir de los estudios realizados, se obtuvieron los valores del cuadro 3, donde se evalúa la calidad de agua; el indicador de % EPT en la estación 1 y 2, presenta un promedio de 45,6 % y 0 %, la presencia de estos individuos de los grupos Ephemeroptera y Tricoptera son indicadores de bajos impacto antrópico [7], [16], tal como se observa en la primera estación, mientras que, porcentajes menores, denotan elevada contaminación, propio de la segunda estación. El índice de diversidad (H) tuvo un promedio de 1,33 y 0,31 respectivamente en ambas estaciones, es decir este índice es bajo [8], en cambio el índice de diversidad de Shannon-Wiener se encuentra en término medio con un valor de 1,33 y 0. La riqueza de Margalef promedio en la estación 1, fue de 2,30 determinándose que es una zona de mediana diversidad y la estación 2, fue de 0,50 determinándose zona de baja diversidad; en cuanto a la Dominancia de Berger-Parker y Simpson sólo en la estación 2 se presentaron taxones dominantes (valores mayores que 0,55) con un promedio de 0,94 a 0,88, indicador de alta contaminación del agua. En la estación 1, no hubo presencia de estos taxones obteniéndose un promedio de 0,25 a 0,37

Cuadro 4. Número de géneros por categoría o grupo trófico encontrados en la estación 1 y 2.

Grupo trófico	Estación			Total
	E1	E2	Ambos	
Colector – Detritívoro	6	6	3	9
Colector – Filtrador	2	0	0	2
Colector – Fragmentador	5	0	0	5
Colector – Raspador	4	0	0	4
Depredador	4	0	0	4
No Identificador (NI)	2	0	0	2
Total	23	6	3	26

En total se colectaron 26 géneros de macroinvertebrados bentónicos (cuadro 4), para un sector del río Chotano entre los meses de agosto a octubre; 23 géneros corresponden a la estación 1 y 6 géneros corresponden a la estación 2, de los cuales 3 géneros estuvieron presentes en ambas estaciones que son colector- detritívoro. En la estación 1, lo más representativos fueron 6 géneros con grupo trófico colectores – detritívoros, seguido con 5 géneros con grupo

trófico colector-fragmentador, 4 géneros son colector-raspador y depredador y 2 géneros son colector-filtrador y 2 géneros no identificado; en la estación 2 se colectaron 6 géneros con grupo trófico colector-detritívoros.

La prueba de Chi cuadrado sobre número de géneros por grupo trófico encontrados en la estación 1 y 2 en un sector del río Chotano de agosto a octubre, evidencian que existen diferencias significativas entre los dos sectores ($p=0,14 > 0,05$).

Cuadro 5. Prueba de Levene para los Índice Biológicos de la calidad de agua estación 1 y 2.

		Prueba de Levene de igualdad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
IBMWP	Se asumen varianzas iguales	7,84	0,03	5,55	6,00	0,0014	49,25	8,87	27,55	70,95
	No se asumen varianzas iguales			5,55	3,02	0,0113	49,25	8,87	21,13	77,37
RIQUEZA	Se asumen varianzas iguales	11,61	0,01	6,60	6,00	0,0006	1,81	0,27	1,14	2,47
	No se asumen varianzas iguales			6,60	3,04	0,0068	1,81	0,27	0,94	2,67

El estadístico de Levene y la prueba t, para el índice IBMWP y la riqueza, aplicadas para evaluar la igualdad de varianzas (cuadro 5), evidencian que existen diferencias significativas entre la variabilidad de ambas estaciones en estudio ($p \leq 0,05$).

Conclusiones

El índice IBMWP (índice de grupo de trabajo de monitoreo biológico) de la familia de macroinvertebrados bentónicos, en base a las cantidades encontradas en ambas estaciones, puede ser un indicador de elevada polución orgánica en la estación 2.

Los grupos encontrados de la riqueza total EPT (%) fueron representativos en la estación 2, debido a su menor porcentaje, evidenciando la presencia de materia orgánica y lodos, propio de la contaminación ambiental del agua.

Las dominancias promedio determinadas, de Berger – Parker y Simpson, fueron menores en la estación 1, mostrando mayor diversidad, indicadores de baja contaminación; sin embargo, la estación 2 muestra poblaciones con mayor dominancia, menor diversidad, indicadores de elevada polución orgánica.

El estudio de los macroinvertebrados como indicador de contaminación orgánica, es importante, porque permite evaluar la calidad del agua; pues, este líquido vital para el ecosistema, es empleado por los pobladores que habitan en las zonas bajas del río, en actividades como, regadío de plantas, bebederos para ganados y también como fuente de agua para consumo

humano, además este estudio, muestra los impactos generados por la actividad humana residentes en la parte alta del río, debido a que carecen de un sistema de tratamiento de aguas residuales, yendo a parar todos los desechos producidos al mismo cauce, generando elevada contaminación.

Esta investigación permite implementar, un sistema de monitoreo constante, debido a la presencia de estos microorganismos, cuya biomasa son indicadores de calidad de las aguas, evitando posibles riesgos de salubridad en las poblaciones que hace uso de las mismas, logrando una mejor calidad de vida.

Agradecimiento

A la Dirección Sub Regional de Salud Chota – Cajamarca y su representante, Lic. Hernán Tafur Coronel, por brindarnos todas las facilidades en el uso de los equipos sofisticados y laboratorios de análisis de agua, de la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental.

Referencias

- [1] G. Roldan, Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia, Bogotá: Editorial Presencia Ltda; 2019. Available: <https://docer.com.ar/doc/11ns1n>
- [2] A. R. Ladson, L. J. White, J. A. Doolan, B. L. Finlayson y B. T. Hard BT, “Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia”, *Fresh Biol*, Vol. 41, no. 2, pp. 453 – 468, 2017. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.00442.x>
- [3] D. Pham, “Linking Benthic Macroinvertebrates and Physicochemical Variables for Water Quality Assessment in Saigon River and Its Tributaries, Vietnam”, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 92 012053, 2017. This content was downloaded from IP address 181.64.105.147 on 09/03/2021 at 17:30
- [4] A. Barboza, C.S. Silva, S.E. Araujo, T. Lima y I. M. Dantas, “Macroinvertebrados Bentónicos como bioindicadores da qualidade da água em um trecho do rio Apodi-Mossoró”, *HOLOS*, vol. 32, no. 7, pp. 121 - 132. 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.4183
- [5] A. Motta, L. Ortega, Y. Niño y N. Aranguren, “Grupos funcionales alimenticios de macroinvertebrados acuáticos en un arroyo tropical (Colombia)”, *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* vol. 19, no. 2, pp. 425-433, 2017. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.04>.
- [6] L. Rodríguez, P. Ríos, M. Espinoza, P. Cedeño y G. Jiménez, “Caracterización de la calidad de agua mediante macroinvertebrados bentónicos en el río Puyo, en la Amazonía Ecuatoriana”, *Hidrobiológica*, vol. 26, no. 3, pp. 497-507, 2016.
- [7] F. Bernardo, C. Fatima, G. Betiato, G. Pasquali, P. Afonso, y M. Teresinha, “Utilização da estrutura de comunidades de macroinvertebrados bentônicos como indicador de qualidade da água em rios no sul do Brasil”, *Ambient. Água*, vol. 12, no. 3, pp. 416 – 426, 2017. doi:10.4136/1980-993X
- [8] J. Granados-Ramírez, P. Barragán, R. Trejo y M. Martínez, “Macroinvertebrados bentónicos de dos lagos de alta montaña en el estado de Morelos, México”, *Intropica*, vol. 12, no. 1, pp. 41–53, 2017. <https://doi.org/10.21676/23897864.2206>
- [9] S. López, D. Huertas, A. Jaramillo, D. Calderón y J. Diaz, “Macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua del río Teusacá (Cundinamarca, Colombia)”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, no. 2, pp. 269–288, 2019. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=139093499&lang=es&site=ehost-live>. Acceso em: 8 mar. 2021.
- [10] S. Sabater, J. Donato, A. Giorgi y A. Elosegí, *El río como ecosistema. Conceptos y técnicas en ecología fluvial*, España: Fundación BBVA; pp. 23-37, 2016.
- [11] D. Simeone, CH. Tagliaro y CR. Beasley, “Amazonian freshwater mussel density: A useful indicator of macroinvertebrate assemblage and habitat quality”, *Ecol. Indic.*, vol. 122, p. 107300, 2021. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107300
- [12] Ministerio del Ambiente, Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú, Lima: UNMSM, 2017.

- [13] M. Custodio y F. Chaname, “Análisis de la biodiversidad de macroinvertebrados bentónicos del río Cunas mediante indicadores ambientales, Junín-Perú”, *Scientia Agropecuaria*, vol. 7, no 1, pp. 33-44, 2017. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.04>
- [14] A. Palma, Guía para la identificación de invertebrados acuáticos, 2016. Available: http://www2.udec.cl/~lpalma/Palma2013_Guia_identificacion_Macroinvertebrados_preview.pdf
- [15] S. Chi, S. Li, S. Chen, M. Chen, J. Zheng y J. Hu, “Temporal variations in macroinvertebrate communities from the tributaries in the Three Gorges Reservoir Catchment, China”, *Revista Chilena de Historia Natural*. Vol. 90, no. 6, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40693-017-0069-y>
- [16] A. Savic, M. Đorđević, M. Jusković y V. Pešić, “Ecological analysis of macroinvertebrate communities based on functional feeding groups: a case study in southeastern Serbia”, *Biologica Nyssana*, vol. 8, no. 2, pp. 159-166, 2017.

Estudio de la eficiencia técnica en escuelas de campo de Nicaragua

Study of technical efficiency in field schools from Nicaragua

Carlos Zúniga-González¹, Luis Moreno-Mayorga²,
Conrado Quiroz-Medina³

Fecha de recepción: 31 de marzo de 2021

Fecha de aprobación: 18 de julio de 2021

Zúniga-González, C; Moreno-Mayorga, L; Quiroz-Medina, C. Estudio de la eficiencia técnica en escuelas de campo de Nicaragua. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 128-140.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5696>

- 1 Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Escuela de Ciencias Agrarias y Veterinarias. Departamento de Agroecología. Centro de investigación en Bioeconomía y Cambio Climático. Nicaragua. Correo electrónico: czuniga@ct.unanleon.edu.ni
 <https://orcid.org/0000-0002-2545-8304>
- 2 Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Escuela de Ciencias Agrarias y Veterinarias. Departamento de Agroecología. Centro de Investigación y Reproducción de Controladores Biológicos. Nicaragua. Correo electrónico: luis.moreno@ev.unanleon.edu.ni
 <https://orcid.org/0000-0002-5431-5230>
- 3 Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León. Escuela de Ciencias Agrarias y Veterinarias. Departamento de Agroecología. Centro de Investigación y Reproducción de Controladores Biológicos. Nicaragua. Correo electrónico: conrado.quiroz@ev.unanleon.edu.ni
 <https://orcid.org/0000-0003-4723-6144>

Palabras clave

Índices de Malmquist; DEAP; SPSS; DEA; INTA.

Resumen

El artículo analizó la eficiencia técnica de los centros de desarrollo tecnológicos (CDT) en el proceso de adopción de nuevos conocimientos, del proceso tecnológico para la producción de hortalizas y granos básicos, en el nivel primario de extensionistas del INTA, durante el ciclo 2010-2011. Se utilizó los registros de datos para los rubros hortícolas y granos básicos de los CDT del Centro Experimental de Occidente (CEO) Posoltega INTA Pacífico Norte, Centro de investigación agropecuaria (CENIA) Managua y Campos Azules (CA), Masatepe. Los materiales utilizados fueron organizados con la metodología de las Escuelas de campo. Los datos resultados de la capacitación se procesaron con el paquete estadístico SPSS y el Software DEAP 2.0 para medir la eficiencia técnica por cada CDT estudiado. La muestra fue de 103 estudiantes de los CDC en el CEO, CENIAB y CA. La metodología aplicada para determinar la Eficiencia Técnica fue la conocida como Índices de Malmquist, y análisis de datos envolventes (DEA) para evaluar las Escuelas de Campo utilizadas en transferir tecnología a los técnicos extensionistas del INTA en los CDT del pacífico. Los resultados evidenciaron que las ECAs en su primera fase alcanzó el 82 % de su capacidad en los tres CDT estudiados, el CEO Posoltega alcanzó el 46 % de su capacidad, mientras que los demás se mantuvieron eficientemente en el 100 % de su eficiencia técnica, que implica las mejores condiciones para la fase II de las ECA dirigida a promotores y productores.

Keywords

Índices de Malmquist; DEAP; SPSS; DEA; INTA.

Abstract

The article analyzed the technical efficiency of the technological development centers (CDT) in the process of adopting new knowledge, of the technological process for the production of vegetables and basic grains, at the primary level of INTA extension workers, during the 2010 cycle- 2011. The data records for the horticultural and basic grains of the CDTs of the Centro Experimental de Occidente (CEO) Posoltega INTA Pacífico Norte, Centro de Investigación Agropecuaria (CENIA) Managua and Campos Azules (CA), Masatepe were used. The materials used were organized with the methodology of the Field Schools. The data resulting from the training were processed with the SPSS statistical package and DEAP 2.0 software to measure technical efficiency for each CDT studied. The sample was 103 CDC students in the CEO, CENIAB and CA. The methodology applied to determine the Technical Efficiency was known as the Malmquist Indices, and the analysis of enveloping data (DEA) to evaluate the Field Schools used to transfer technology to INTA extension technicians in the Pacific CDTs. The results showed that the ECAs in their first phase reached 82% of their capacity in the three CDTs studied, the CEO Posoltega reached 46% of their capacity, while the others were efficiently maintained at 100% of their technical efficiency, which implies the best conditions for phase II of the ECAs aimed at promoters and producers.

Introducción

El desarrollo de las Escuelas de Campo en tres Centros de Desarrollo Tecnología (CDT) del INTA, con los extensionista, se pretende fortalecer y consolidar los conocimientos, Además de la apropiación de la tecnología, técnicas y estrategias de Manejos integrados de Cultivos (MIC), Manejo Integrado de Plagas (MIP) así como buenas prácticas agrícolas (BPA) a través de esta metodología. Innovación de tecnología, investigaciones participativas, desarrollo de ensayos de aprendizaje. Donde el extensionista el ejecutor y actor de esta experiencia, con el apoyo de los facilitadores personal de PROMIPAC y UCATSE. Permanente en las sesiones de trabajo y conferencias de especialistas en temas específicos, de Riego, Nutrición, MIP, Fitoproteccion Inteligente, Control Biológico, Fitopatología, Manejo seguro de plaguicidas, entre otros [1].

El análisis prospectivo permitirá que el INTA a través de sus extensionistas pueda evaluar y proyectar el desarrollo de escuelas de campo con promotores de asistencia técnica y productores en la producción de hortalizas y granos básicos [2].

Dado que en ella se recoge, fortalecimiento del aprendizaje, factores influyentes, lecciones aprendidas y consideraciones de sostenibilidad y adaptabilidad del proceso.

La limitada documentación de los procesos de conocimientos y aplicación de nuevas tecnologías que se integran y se combinan de manera oportuna para el manejo de suelo, riego, plagas y enfermedades en los cultivos de hortalizas y granos básicos, ha provocado, mal manejo de la tecnología, la mala toma de decisiones, el uso irracional e indebido de los plaguicidas sintéticos, causado resistencia a plagas por ciertos ingredientes activos de algunas formulaciones, siendo menos productivos por unidad de superficie y menos rentables [3].

La mala toma de decisión en los productores puede ser por la falta de conocimientos de aplicaciones de muestreo, reconocimientos del entorno en cuanto a insectos plagas, benéficos, vectores, enfermedades si son causadas por hongo bacterias o es un virus, o problemas nutricionales. Otro factor es la metodología de extensión aplicada por el INTA, donde el número de productores por extensionistas es grande y el tiempo que se le dedica al productor es poco, no se hace un buen análisis en la parcela, donde todo el manejo es calendarizado no partiendo de un análisis de Agroecosistema, encareciendo los costos de producción [4].

Revisión de la literatura

La revisión de la literatura se centró en definir las metodologías utilizadas por los extensionistas para realizar transferencia tecnológica, en tal sentido nos referimos a Escuela de Campo, Campesino a campesino, Manejo integrado de Plagas (MIP), Control integrado de Plagas (CIP), Buenas practica agrícolas.

Escuela de Campo

Las Escuelas de Campo, (ECA), están constituidas por grupos de agricultores y agricultoras que se reúnen semanalmente, durante todo el ciclo vegetativo de un cultivo, con el fin de compartir y valorizar el conocimiento local, adquirir nuevos conocimientos y encontrar mejores estrategias para el manejo de nuevas tecnologías. Durante el proceso están siempre acompañados por un facilitador, persona que tiene la función de estimular el auto aprendizaje de cada uno de los participantes a través de la observación, reflexión y el análisis de los fenómenos o procesos que ocurren en el contexto de la ECA.[5]

El inicio de las ECA en Centroamérica

En los años 70 se inició, en los países en desarrollo, el cuestionamiento del enfoque tradicional de los sistemas de investigación/extensión, ya que no había conseguido logros significativos en una agricultura campesina caracterizada por sus prácticas ancestrales, en la que difícilmente se lograban los beneficios de la innovación.

Este enfoque clásico fue sustituido paulatinamente por un enfoque más horizontal y participativo en el que las familias rurales asumieron la responsabilidad del proceso de innovación, y el extensionista pasó a tener un papel de facilitador. En este sentido, una de las metodologías más conocida y efectiva en Centroamérica es la de “Campesino a Campesino”, en la que los productores y productoras con mayores habilidades para la experimentación transfieren sus experiencias e integran la innovación a partir del conocimiento local.

En este mismo esquema, en el año 2000, el Programa para el Manejo Integrado de Plagas en América Central (PROMIPAC) introdujo la metodología de las ECAs en Nicaragua y El Salvador, e inició un proceso para favorecer su disseminación a través del apoyo o la formación de facilitadores y facilitadoras en esta metodología.

Una de las prioridades del Ministerio Agropecuario y Forestal de Nicaragua, el INTA y la FAO, a través del Programa Especial para la Seguridad Alimentaria (PESA), ha sido la definición de un modelo de desarrollo agrícola para la zona seca, adecuado a las condiciones de los grupos participantes con los que trabaja el PESA. Para ello, se ha considerado necesario contar con una metodología de atención grupal que facilite el trabajo de los técnicos y que permita mayor cobertura de la población meta.

En Nicaragua, solo el 15% de los agricultores y agricultoras reciben asistencia técnica a pesar de los esfuerzos que realizan las instituciones públicas, las agencias de cooperación y las organizaciones de la sociedad civil. La escasez de recursos destinados a este sector se considera la causa principal para esta limitada cobertura [6].

Toda esta experiencia acumulada en cuanto al manejo integrado de plagas ha permitido crear elementos que han creado una capacidad nacional que se traduce en el desarrollo exitoso de un Programa de Manejo Integrado de Cultivos (MIC) en Nicaragua [7], [8]. Entre estos elementos están los siguientes;

- Nicaragua ha sido precursora de conocimientos y tecnologías en MIP.
- Existen en el país talentos humanos capacitados en diferentes especialidades de MIP y Manejo de Cultivos.
- La problemática fitosanitaria de los cultivos está bien identificada.
- Existen ofertas tecnológicas MIP en diferentes rubros de importancia económica, generadas y desarrolladas bajo condiciones de Nicaragua para un buen número de problemas fitosanitarios.
- Existen estructuras operativas de coordinación interinstitucional que facilitan el impulso de proyectos fitosanitarios de relevancia nacional.
- Diversas instituciones, organismos y proyectos impulsan actualmente acciones de MIP como parte de un esfuerzo común de implementar una agricultura ambiental y económicamente sostenible, que proteja el ambiente, la salud humana y los recursos naturales.
- Instituciones educativas están incluyendo en sus programas de enseñanza y objetivos, la promoción y capacitación en el enfoque MIP [9].

El proceso de transición de PROMIPAC hacia la metodología de ECA fue muy fácil debido a que El Zamorano siempre tuvo como metodología de enseñanza, y como el principio que lo ha diferenciado de otras instituciones educativas, el 'aprender haciendo' [10], [11].

De acuerdo con Werner [12], el 90% de los productores que participaron en las ECAs tiene como cultivos principales los granos básicos, de los cuales el 84% cultiva maíz, el 68% el frijol, y el 15% el maicillo. Esto indica que PROMIPAC está trabajando principalmente con productores de granos básicos. Sin embargo, un buen porcentaje de los productores que participaron en las ECAs tiene cierto nivel de diversificación hacia otros cultivos. Para el 50% de estos productores los frutales son uno de sus cultivos principales, mientras que para el 35% lo son las hortalizas (tomate, cebolla, chiltoma o chile dulce, ayote, pipian y repollo, en orden de importancia), para el 29% es el café, para el 22% las musáceas, y el 58% de los productores tienen otros cultivos pero con áreas sembradas muy pequeñas. En términos de la diversificación dentro de una misma finca, la mayoría de los productores (83%) tiene entre uno y tres cultivos principales sembrados. Entre un 10-30% de los agricultores tiene entre cuatro y seis cultivos principales, y solamente entre 1-5% de los agricultores llega a tener entre siete y once cultivos, mostrando un alto nivel de diversificación y resiliencia.

Si embargo, Werner [12] Los niveles de uso de estos productos alternativos, aún en los productores que han participado en las ECAs, son relativamente bajos. El 28% utiliza biofertilizantes, el 23% lombríhumus, el 23% agua azucarada, el 21% sulfocalcio, el 15% cal y ceniza, el 14% abonos orgánicos, el 12% tierra negra, y el 12% neem. Para el caso del gramoxone no se encontraron alternativas de productos para sustituir su uso. Por esta razón, la práctica que muchos productores usan es el control manual de malezas, pero no necesariamente es una respuesta para sustituir el uso del gramoxone sino más bien es una práctica cultural que los productores realizan tradicionalmente.

Una de las críticas constantes que se hacen sobre las ECAs, y en general sobre los métodos de extensión e investigación participativos, es que estos son costosos y llegan a audiencias relativamente pequeñas [13], [14], [15], [16]. Sin embargo, los técnicos que apoyan estas iniciativas tienen una visión diferente como lo expresa Dorian Velásquez, técnico de CARITAS-Estelí: "Con las ECAs podemos llegar a mucha más gente y tocar más temas que con la extensión tradicional. Por ejemplo, yo atendí 25 productores en la ECA, y éstos se capacitaron en muchas cosas que les van a servir, no sólo en sus cultivos, sino también para sus animales si quieren, y esa gente que fue capacitada en la ECA le transmite a otra gente que está a su alrededor. En las ECAs participan los promotores de las comunidades y estos no sólo aplican lo que aprenden sino que también lo difunden en sus comunidades" [17], [18].

Werner [12] encontró El 34% de los productores que participaron en las ECAs han compartido lo aprendido en éstas, de los cuales el 71% dicen hacerlo a través de comunicaciones con el resto de miembros de la familia, vecinos y amigos, y el 28% a través de demostraciones en su unidad productiva o en eventos preparados con ese fin. Las organizaciones locales, socias de PROMIPAC, también se encargan de difundir la tecnología, como lo explican los técnicos de CARITAS-Matagalpa: "Para introducir una nueva tecnología en una comunidad no lo hacemos con todos los productores, se selecciona a un grupo de productores que prueban y validan esta nueva tecnología, y sólo cuando tenemos resultados, entonces se difunde a otros productores hasta que tengamos un resultado".

El 100% de los participantes entrevistados aceptarían nuevamente el reto de participar en una ECA. Sin embargo afirmaron que están más interesados en cultivos nuevos para ellos como son las hortalizas (60%) y frutales (17%), y sólo un 8% volvería a participar en una ECA en granos básicos. Este tipo de respuesta es apenas lógica, ya que los productores están más

interesados en invertir su tiempo en aprender sobre cultivos de mayor valor que los granos básicos, los cuales no saben manejar ni comercializar, pero que tienen un mayor potencial de generar ingresos [12].

La FAO, ha elaborado una definición, más descriptiva y explícita de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), al señalar que: “consiste en la aplicación del conocimiento disponible a la utilización sostenible de los recursos naturales básicos para la obtención de productos agro-alimentarios y no alimentarios, inocuos y saludables, a la vez que se procuran la viabilidad económica y la estabilidad social” [19].

Metodología

La metodología de investigación es la conocida como el índice de Malmquist, este índice calcula cuatro distancias para cada una de las fincas objeto de estudio. a) La frontera DEA con las tecnologías Manejo Integrado de Plagas (MIP) y Buenas prácticas agrícola (BPA) a rendimientos a escala constante del período previo, b) la frontera DEA a con las tecnologías Manejo Integrado de Plagas (MIP) y Buenas prácticas agrícola (BPA) rendimientos de escala constante del período actual, c) la frontera DEA con las tecnologías Manejo Integrado de Plagas (MIP) y Buenas prácticas agrícola (BPA) a rendimientos de escala constante del siguiente período, y d) la frontera DEA con las tecnologías Manejo Integrado de Plagas (MIP) y Buenas prácticas agrícola (BPA) a escala de rendimientos decrecientes.

Fare [20] específico un índice de cambio productivo de Malmquist basado en un output, de igual manera este índice se puede calcular para un índice PTF de Malmquist con un input orientado como el presentado por Fare [21], como se refleja en PL 1.

La aplicación del método de Malmquist DEA para calcular cambios en los índices de productividad total de factores (PTF); cambio de las tecnologías Manejo Integrado de Plagas (MIP) y Buenas prácticas agrícola (BPA); cambio de eficiencia técnica, cambio de escala de eficiencia. Estos métodos son discutidos en [20].

Cuando uno tiene un panel de datos, uno puede usar DEA como programas lineal y un (basado en input / output) Malmquist índice de TFP (Total factor de producción) para medir cambio de productividad, y para descomponer este cambio de productividad en cambio de tecnología y cambio de eficiencia técnica.

Fare et al., [22] especificaron un output basado en el índice de cambio de productividad de Malmquist como:

$$m_0(y_{t+1}, x_{t+1}, y_t, x_t) = \left[\frac{d_0^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_0^t(x_t, y_t)} \times \frac{d_0^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})}{d_0^{t+1}(x_t, y_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{PL1})$$

Esto representa la productividad de la producción en el punto (x_{t+1}, y_{t+1}) relativo al punto de producción (x_t, y_t) . Un valor mayor que uno indicara crecimiento del TFP del período t para el período t+1. Este índice, es en realidad, el significado geométrico de dos output basados en índices TFP de Malmquist. Un índice usado en el periodo t de la tecnología y el otro periodo de la tecnología t+1. Para calcular la PL 1 debemos calcular las cuatro funciones de las distancia de los componentes, de los cuales se involucran los problemas de PL (similar a los conducidos para calcular la medida de Farrel en la eficiencia técnica (ET)).

Comenzaremos asumiendo que la tecnología REC (conducimos además la descomposición más tarde para buscar las preguntas de la eficiencia a escala). La PL REC output orientado usado para calcular $d_0^t(x_t, y_t)$ es definido en la PL 1 y 2, excepto que la convexidad (RED) restricción ha sido removida y los tiempos subscriptores han sido incluido. Esto es:

$$\begin{aligned}
 [d_0^t(x_t, y_t)]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a } &-\phi y_{it} + Y_t \lambda \geq 0, \\
 &x_{it} - X_t \lambda \geq 0, \\
 &\lambda \geq 0,
 \end{aligned} \tag{PL2}$$

Los problemas de PL son simple variaciones de esto:

$$\begin{aligned}
 [d_0^t(x_t, y_t)]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a } &-\phi y_{i,t+1} + Y_{t+1} \lambda \geq 0, \\
 &x_{i,t+1} - X_{t+1} \lambda \geq 0, \\
 &\lambda \geq 0,
 \end{aligned} \tag{PL3}$$

$$\begin{aligned}
 [d_0^t(x_{t+1}, y_{t+1})]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a } &-\phi y_{i,t+1} + Y_t \lambda \geq 0, \\
 &x_{it} - X_t \lambda \geq 0, \\
 &\lambda \geq 0,
 \end{aligned} \tag{PL4}$$

$$\begin{aligned}
 [d_0^{t+1}(x_t, y_t)]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a } &-\phi y_{it} + Y_t \lambda \geq 0, \\
 &x_{it} - X_{t+1} \lambda \geq 0, \\
 &\lambda \geq 0,
 \end{aligned} \tag{PL5}$$

Note que en la PL de 4 y 5, donde los puntos de producción son comparados a tecnologías de diferentes tipos de períodos, el parámetro ϕ no necesita ser ≥ 1 , como debe ser cuando calculamos la eficiencia de Farell. El punto debe ubicarse debajo de conjunto de producción factible.

Esto ocurriría más probablemente en LP 4 donde el período del punto de producción t+1 es comparado para tecnología en el período t. Si el progreso tecnológico ha ocurrido, entonces un valor de $\phi < 1$ es posible. Note que también es posible que ocurra en PL 5 si el regreso tecnológico ha ocurrido, pero esto es menos probable.

Algunos puntos para mantener en mente son probablemente que los ϕ y λ tomen valores diferentes en los cuatros de la PL. Además, note que los cuatro de PLs deben ser calculados para cada finca en la muestra. Así, si usted toma 20 fincas y 2 tiempos de período se debe calcular 80 PL. Note también que como usted agrega tiempos de período extra, usted debe calcular tres PL para cada finca (para construir un índice cambiado). Si usted tiempo T períodos,

usted debe calcular (3T-2) PL para cada finca en la muestra. De ahí, si usted tiene N fincas, usted necesitará calcular N * (3T-2) PLs. Por ejemplo, con N=20 fincas y T=10 período, debería proveer 20 * (3X10-2)= 560 PLs.

Universo de estudio, selección y tamaño de muestra, unidad de análisis y observación

La muestra se calcula en base a la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1) + k^2 * q * p)}$$

N: es el tamaño de la población o universo (número total de posibles encuestados).

k: es una constante que depende del nivel de confianza que asignemos. El nivel de confianza indica la probabilidad de que los resultados de nuestra investigación sean ciertos: un 95,5 % de confianza es lo mismo que decir que nos podemos equivocar con una probabilidad del 4,5%.

Los valores k más utilizados y sus niveles de confianza son:

k: 1,15 1,28 1,44 1,65 1,96 2 2,58

Nivel de confianza: 75% 80% 85% 90% 95% 95,5% 99%

e: es el error muestral deseado. El error muestral es la diferencia que puede haber entre el resultado que obtenemos preguntando a una muestra de la población y el que obtendríamos si preguntáramos al total de ella. Ejemplos:

- Ejemplo 1: si los resultados de una encuesta dicen que 100 personas comprarían un producto y tenemos un error muestral del 5% comprarán entre 95 y 105 personas.
- Ejemplo 2: si hacemos una encuesta de satisfacción a los empleados con un error muestral del 3% y el 60% de los encuestados se muestran satisfechos significa que entre el 57% y el 63% (60% +/- 3%) del total de los empleados de la empresa lo estarán.
- Ejemplo 3: si los resultados de una encuesta electoral indicaran que un partido iba a obtener el 55% de los votos y el error estimado fuera del 3%, se estima que el porcentaje real de votos estará en el intervalo 52-58% (55% +/- 3%).

p: es la proporción de individuos que poseen en la población la característica de estudio. Este dato es generalmente desconocido y se suele suponer que p=q=0.5 que es la opción más segura.

q: es la proporción de individuos que no poseen esa característica, es decir, es 1- p.

n: es el tamaño de la muestra (número de encuestas que vamos a hacer).

La muestra fue de 3 CDC en el CEO, CENIAB y CA, y la participación de 103 estudiantes.

Procedimientos para la recolección de información, instrumentos a utilizar y métodos para el control de calidad de los datos

El procedimiento para la recolección de datos fue el registro y la observación en cada centro de experimentación, con la participación de estudiantes y técnicos del INTA.

El DEAP es un programa concebido para usar los métodos DEA [23], [24], [25].

En la figura 1 se presenta un ejemplo de un output-orientado DEA, representado por un segmento lineal de la curva posibilidades de producción, donde se puede notar que las observaciones (p y q) se ubican por debajo de la curva, y que las secciones de la curva, las cuales están en el ángulo derecho de la abscisas causará holguras del output para ser calculadas donde el punto es proyectado en estas partes de la curva por una expansión radial en outputs. Por ejemplo, el punto P es proyectado al punto P', el cual está en la frontera pero no en la frontera de eficiencia, porque la producción de Y_1 puede ser incrementada por la cantidad AP sin usar más inputs. Se interpreta como output de holgura en el caso AP' en el output Y_1 .

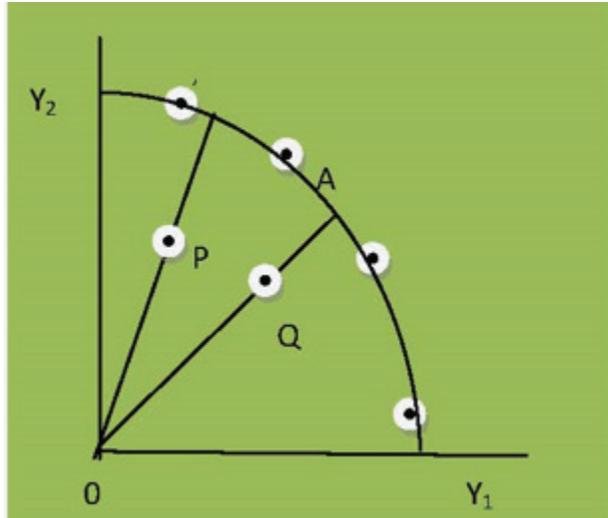


Figura 1. Output-orientado DEA.

Señalamos anteriormente, que la PL (5) es utilizada para calcular $d_0^t(x_t, y_t)$, con la excepción que la restricción de la convexidad de rendimientos a escala variables (REV) ha sido removida y el tiempo suscrito ha sido incluido. De tal manera que:

$$\begin{aligned}
 [d_0^t(x_t, y_t)]^{\frac{1}{2}} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a. } -\phi y_{it} + Y_t \lambda &\geq 0, \\
 x_{it} - X_t \lambda &\geq 0, \\
 \lambda &\geq 0,
 \end{aligned}
 \tag{PL6}$$

Los tres problemas de PL restantes son simple variaciones de esto:

$$\begin{aligned}
 [d_0^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1})]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a. } -\phi y_{i,t+1} + Y_{t+1} \lambda &\geq 0, \\
 x_{i,t+1} - X_{t+1} \lambda &\geq 0, \\
 \lambda &\geq 0,
 \end{aligned}
 \tag{PL7}$$

$$\begin{aligned}
 [d_0^t(x_{t+1}, y_{t+1})]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a. } -\phi y_{i,t+1} + Y_t \lambda &\geq 0, \\
 x_{i,t+1} - X_t \lambda &\geq 0, \\
 \lambda &\geq 0,
 \end{aligned} \tag{PL8}$$

$$\begin{aligned}
 [d_0^{t+1}(x_t, y_t)]^{-1} &= \max_{\phi, \lambda} \phi, \\
 \text{s. a. } -\phi y_{it} + Y_{t+1} \lambda &\geq 0, \\
 x_{i,t} - X_{t+1} \lambda &\geq 0, \\
 \lambda &\geq 0,
 \end{aligned} \tag{PL9}$$

Es de notar que en las PLs (8) y (9), donde los puntos de producción son comparados a tecnologías de diferentes períodos, el parámetro no necesita ser ≥ 1 , como debe ser cuando se calcula la eficiencia de Farrell. El punto debe permanecer arriba del conjunto de puntos de producción deseable. Esta situación ocurriría más comúnmente en la PL (5) donde el punto de producción del período t+1 es comparado con la tecnología en el período t. Si el progreso técnico ha ocurrido, entonces el valor de $\phi < 1$ es posible. Agregamos la posibilidad de ocurrencia en LP (9) si el progreso tecnológico ha ocurrido, pero esto es menos probable.

Es importante, mantener en mente que los parámetros son probabilidad que pueden tomar valores diferentes en los cuatros PLs presentados arriba. Además, notemos que los cuatros PLs deben ser calculado para cada CDT de la muestra. De tal manera, que si usted tiene 20 fincas y 2 períodos de tiempo (por ejemplo en nuestro estudio consideramos 1 tiempo, a saber 2010-2011), pues bien usted debe calcular 80 PLs para cada CDT para construir el índice encadenado. Si usted tiene T períodos de tiempo, usted debe calculara (3 T – 2) PLs para cada CDT de la muestra. De ahí, si usted tiene N CDT, usted necesitará calcular N X (3 T-2) PLs. Por ejemplo, en nuestro estudio tenemos N=3 CDT y T= 1 (2010-2011), estos datos resultarían 3 X (3 X 1 -2) = 3 PLs.

Datos

Los datos resultados de la capacitación se procesaron con el paquete estadístico SPSS y el Software DEAP 2.0 para medir la eficiencia técnica por cada CDT estudiado.

Las variables utilizadas fueron:

Centro de desarrollo tecnológico (CDT): Centro Experimental de Occidente (CEO) Posoltega, Centro de investigación agropecuaria (CENIA) Managua, Campos azules (CA) Masatepe, cada CDT está ubicado en diferentes zonas geográficas del país.

- Área de siembra en Mz: 1 manzana
- Ingresos: Unidad de medida en córdobas.
- Horas maquina: Unidad de medida h/maq. Corresponde las horas maquinas utilizadas en el proceso de producción.
- Días hombres: Unidad de medida d/h y corresponde a los d/h utilizados por cada CDT en el proceso de producción.
- Costo total: Unidad de medida en córdobas y corresponde al costo total utilizado por cada CDT.

- Costos por insumo: Costos por cada uno de los insumos utilizados por cada rubro.
- Costos de mano de obra: Costos de mano de obra utilizada en el proceso por cada CDT.

Cuadro 1. Rubros utilizados por CDT.

CEO Posoltega	CENIA Managua	CA Masatepe
Arroz	Maíz	Maíz
Pepino	Pepino	Pepino
Pipián	Pipián	Pipián
Tomate	Tomate	Tomate
Chiltoma	Chiltoma	Chiltoma
Cebolla		
Sandilla		

Resultados

Resultados Eficiencia Técnica de los CDT

Los resultados del cuadro 2, evidenciaron que las ECAs en su primera fase alcanzo el 82 % (promedio) de su capacidad en los tres CDT estudiados, el CEO Posoltega alcanzo el 46 % de su capacidad, mientras que los demás se mantuvieron eficientemente en el 100 % de su eficiencia técnica, que implica las mejores condiciones para la fase II de las ECA dirigida a promotores y productores. Por supuesto, que las causas de estos resultados no fue el estudio, sin embargo en cuanto a eficiencia técnica tiene que ver con los procesos de capacitación y extensión utilizados por los extensionista, de tal manera que los efectos de sus técnicas y transferencias son las que consideramos.

Cuadro 2. Promedio de Eficiencia Técnica para las ECAS ciclo 2010-2011.

	ECAS	ET
1	CEO	0.455
2	CENIA	1
3	CEA	1
	Promedio*	0.818

* Es un promedio geométrico

En el cuadro 3 se observamos por sus nivel de eficiencia técnica efectuada por los técnicos y extensionistas en cada CDT, como cada CDT es un ejemplo a seguir (par) por los otros, en tal sentido vemos que el CEO por su bajo nivel de eficiencia (46 %) no puede o no fue par de ninguno, en el caso del CENIA 1 vez e igual para CA.

Cuadro 3. Pares de DEA para el estudio de las ECAS, ciclo 2010-2011.

	ECAS/CDT		2009/2010	Conteo*
1	CEO	3	2	0
2	CENIA	2		1
3	CA	3		1

* Conteo de los pares, que significa el número de veces que una ECA actúa como par de otra.

Conclusiones y discusión

Las ECAS en su primera fase alcanzo el 82 % de su capacidad en los tres CDT estudiados, el CEO Posoltega alcanzo el 46 % de su capacidad, mientras que los demás se mantuvieron eficientemente en el 100 % de su eficiencia técnica, que implica las mejores condiciones para la fase II de las ECA dirigida a promotores y productores [26], [27], [28].

Estos resultados sugieren revisar la manera organizativa y técnica utilizada en el CEO y que pudiera compartirse con los demás CDT a los efectos de identificar los elementos que hicieron que la ET bajara a 46 % con relación a los demás CDT. En base a ello sugerimos [29]: 1. Incluir en las ECA II fase la toma de datos para la evaluación técnica. 2. Divulgar la metodología de las ECAS como un instrumento de gestión del desarrollo local sostenible en la transferencia tecnológica. 3. Promover las evaluaciones DEA en las ECAS para medir la productividad y la eficiencia técnica con los funcionarios del INTA en la transferencia de tecnología a los sectores productivos con menos recursos económicos [30], [31], [32]. Destacamos la importancia de este trabajo, dado que generalmente la metodología de medir las ECAS se centra en métodos cualitativos.

Referencias

- [1] Viachica, E. V., Ampie, J. D. C. H., & Sequeira, A. A. Evaluación del impacto en seguridad alimentaria del proyecto escuelas de campo (ECAs), dirigido a pequeñas familias campesinas de las comunidades el Terrero y el Mamey del municipio de San José de Cusmapa, Madriz. *La Calera*, 2010,10(15), 62-68.
- [2] Aguilera Pupo, E.. la evaluación del impacto de los proyectos extensionistas en la universidad de Holguín. *Revista Didasc@lia: Didáctica y Educación*, 2018, 9(2).
- [3] Gárgano, C.. Ciencia, Tecnología y Mercado: Investigaciones en Arroz en el INTA argentino. *Journal of technology management & innovation*, 2018, 13(1), 75-83.
- [4] Landini, F. P., Bianqui, V., & Russo, M.. Evaluación de un proceso de capacitación para extensionistas rurales implementado en Paraguay. *Revista de Economía e Sociología Rural*, 2013,51, s009-s030.
- [5] INTA FAO. Guía metodológica de Escuelas de Campo para facilitadores y facilitadoras en el proceso de extensión agropecuaria. Programa en el Marco de la Seguridad Alimentaria Nutricional (PESA) Nicaragua. 2011
- [6] FAO PESA, Guía metodológica de escuelas de campo para facilitadores y facilitadoras en el proceso de extensión agropecuaria. (2005). Visitado en octubre del 2020 <http://www.fao.org/3/at025s/at025s.pdf>
- [7] Quiroz Medina, C. R., Castellón, J. D., Cea Navas, N. E., Ortiz, M. S., & Zuniga-Gonzalez, C. A.. Characterization of the edaphic macrofauna in different agroforestry systems, in the Municipality of San Ramón, Department of Matagalpa, Nicaragua. *Nexo Revista Científica*, (2021)34(02), 572–582. <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i02.11542>
- [8] Conrado Quiroz, Cynthia Tercero, Torsten Dikow & Jean-Michel Maes. Mydidae (Diptera) de Nicaragua. *Revista Nicaragüense de Entomología*. Número 241. 2021 <https://doi.org/10.5281/zenodo.5348546>
- [9] Instituto Nacional de Tecnología agropecuario, INTA. “Informe de Gestión de Gobierno 2005”.(2005) Visitado en octubre del 2020 <https://www.enriquebolanos.org/media/informe/Informe%20de%20Gobierno%202005%20INTA.pdf>
- [10] Bentley, J; Andrews, K.. Through the roadblocks: IPM and Central American smallholders. *ternational Institute for Environment and Development. Gatekeeper Series* 56:4-14. (1996)
- [11] Bentley, Jeffery W. “The Mothers, Fathers and Midwives of Invention,” pp. 281-289. In Gabriele Stoll *Natural Crop Protection in the Tropics: Letting Information Come to Life*. Weikersheim, Alemania: Margraf Verlag. . (2000) 376 pp.
- [12] Werner Melara, Octavio y F. Pilarte. Informe de evaluación del impacto de las Escuelas de Campo en la implementación del Manejo Integrado de Cultivos en Nicaragua, y El Salvador. Zamorano PROMIPAC: El Zamorano Honduras. (2003)
- [13] Trutmann, P., & Bentley, J.. Mid-term Evaluation of the ‘Programa de Manejo Integrado de Plagas en América Central’(PROMIPAC). Preparado para la Agencia Suiza para la Ayuda Humanitaria y la Cooperación para el Desarrollo (SDC) (2003)



- [14] Bentley, J., *Folk Experiments and Farmer Field Schools: (2003)19p.*
- [15] Godtland, Erin, Elisabeth Sadoulet, Alain de Janvry, Rinku Murgai y Oscar Ortiz (2003), "The Impact of Farmer-Field-Schools on Knowledge and Productivity: A Study of Potato Farmers in the Peruvian Andes", Department of Agricultural & Resource Economics, UCB. CUDARE Working Paper 963.
- [16] Bentley, J. (2003). *Desarrollo Participativo de Tecnología en el Trópico de Cochabamba.* Bentley, informe de Proyecto CONCADE.
- [17] Jara, Ó.. *Sistematización de experiencias, investigación y evaluación: aproximaciones desde tres ángulos.* Costa Rica: CEP. (2013)
- [18] GTZ, *Enfoque participativo sensible en los aspectos de género. Manual de Entrenamiento.* El salvador, Guía de sistematización. (1996)
- [19] FAO. *The State of Food Insecurity in the World. monitoring progress towards the World Food Summit and Millennium Development Goals.* ISBN 92-5-105178-X 2004. Visitado octubre 2021 untitled (fao.org)
- [20] Färe, R., S. Grosskopf, M. Norris, and Z. Zhang: "Productivity Growth, Technical Progress and Efficiency Changes in Industrialised Countries.: " *American Economic Review* 84 (1994), 66-83.
- [21] Färe, R., Grosskopf, S., Lovell, C. K., & Yaisawarng, S. (1993). Derivation of shadow prices for undesirable outputs: a distance function approach. *The review of economics and statistics*, 374-380.
- [22] Fare, R., Färe, R., Fèare, R., Grosskopf, S., & Lovell, C. K.. *Production frontiers.* Cambridge university press. (1994)
- [23] Coelli, T. J.. *A computer program for frontier production function estimation: Frontier version 2.0.* Economics letters, 39(1), 29-32. (1992)
- [24] Coelli, T. J.. "A Guide to FRONTIER Version 4.1: A Computer Program for Stochastic Frontier Production and Cost Function Estimation." Mimeo, Department of Econometrics, University of New England, Armidale. (1994)
- [25] Coelli, T. J., D. S. P. Rao, and G. E. Battese: *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis* (Kluwer Academic Publishers: Bos-ton, 1998). (1998)
- [26] Palomares, R. D., Alcaide, D., Diz, J., Jurado, M., Prieto, A., Morantes, M., & Zúñiga, C. A. (2015). Análisis de la eficiencia de sistemas agropecuarios en América latina y el Caribe mediante la incorporación de aspectos ambientales. *Revista Científica veterinaria Universidad del Zulia*, 25(1), 43-50.
- [27] Zúniga, G., Carlos, A., (2011). Technical efficiency of organic fertilizer in small farm of Nicaragua. 1998-2005. *African Journal of Business Management* Vol. 5 (3). pp 967-973, 4 February, 2001. doi:10.5897/AJBM10.873 ; Available online at: <http://www.academicjournals.org/AJBM> ISSN 1993-8233, 2011 Academic Journals.
- [28] Zuniga González, C. A. (2020). Total factor productivity growth in agriculture: Malmquist index analysis of 14 countries, 1979-2008. *Revista Electrónica De Investigación En Ciencias Económicas*, 8(16), 68-97. <https://doi.org/10.5377/reice.v8i16.10661>.
- [29] Marinero Orantes, E., Vargas Cañas, J. I., Catari, G., Martínez, L., Sardiñas Gómez, O. F., & Zúniga González, C. A.. Analysis of public and private agenda of the Bioeconomy in Central America and the Caribbean: Case Studies of El Salvador, Honduras, Nicaragua and Cuba. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, (2015)1(1), 242-284. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v1i1.2151>
- [30] Zúniga, G. Carlos A.,. *Impacto de los Sistemas de Producción Agropecuarios en el Desarrollo Local Sostenible de Nicaragua, 1998-2005: Índice de Malmquist DEA con un Output Orientado.* 04 de Agosto del 2010. (2013) *Universitas (León)*, Volumen 4, número 1, 2013, 10-17, ISSN 2071-257X ©UNAN León, Editorial Universitaria.
- [31] Blanco-Orozco, N., Arce-Díaz, E., & Zúñiga-González, C.. Integral assessment (financial, economic, social, environmental and productivity) of using bagasse and fossil fuels in power generation in Nicaragua. *Revista Tecnología en Marcha*, (2015)28(4), 94-107.
- [32] Blanco, N., & Zúniga, C.. Productivity analysis in power generation plants connected to the national grid: A new case of bio economy in Nicaragua. *Journal of Agricultural Studies*, 2013, 1(1), 81-102.

Diseño de un biorreactor tipo tanque agitado para el crecimiento de *Rhodococcus opacus*

Design of a stirred tank type bioreactor for the growth of *Rhodococcus opacus*

Pablo Bogantes-Portuguez¹

Fecha de recepción: 3 de mayo de 2021
Fecha de aprobación: 30 de agosto de 2021

Bogantes-Portuguez, P. Diseño de un biorreactor tipo tanque agitado para el crecimiento de *Rhodococcus opacus*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 141-157.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5653>

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: pablo@bogantesportuguez.com

Palabras clave

Biorreactor; configuración modular; *Rhodococcus opacus*; esterilización.

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un biorreactor de tipo tanque agitado asistido por microcontrolador utilizando conceptos de simplicidad de uso, modularidad, estética y ergonomía, según las necesidades de la empresa Cibus 3.0. El tanque cuenta con tres partes principales: tapa, dispone sus elementos según su uso; caja de sensores, dispositivo que utiliza sensores de pH, temperatura y turbidez del medio; y tanque, con una capacidad volumétrica de 21.5 L. Se acopló un vaporizador de mano genérico como método de esterilización *in situ*. Para evaluar la eficiencia de esterilización se realizaron muestreos superficiales en las zonas más críticas de formación de biofilms (tapa, tubos, pared, impulsor y flecha), tras fermentaciones de *E. coli* y *R. opacus*. Se demostró que la máquina de vapor no cumple con el objetivo de eliminar la contaminación, logrando una esterilización del 92%. Sin embargo, el uso de autoclave permitió el rendimiento esperado de esterilización, esto se comprobó al realizar simulaciones de fermentación con medio estéril y no presentar contaminación al finalizar el ensayo. Se determinó la posibilidad de utilizar sensores de pH, sólidos suspendidos y temperatura tomando parte del medio para cada repetición sin afectar la inocuidad del sistema. De esta manera se introduce un dispositivo capaz de tomar las mediciones por medio de microcontrolador. Con el fin de corroborar la funcionalidad del equipo diseñado, se realizaron tres fermentaciones con la bacteria *R. opacus*, donde se obtuvieron curvas de crecimiento validando el funcionamiento del diseño alrededor del usuario y del proceso.

Keywords

Bioreactor; modular configuration; *Rhodococcus opacus*; sterilization.

Abstract

This article presents the design of a microcontroller-assisted stirred tank bioreactor using concepts of simplicity of use, modularity, aesthetics, and ergonomics, according to the needs of the Cibus 3.0 company. The tank has three main parts: lid (it has its elements according to its use); sensor box (device that uses pH sensors, temperature, and turbidity of the medium); and tank (with a volumetric capacity of 21.5 L). A generic handheld vaporizer was attached as a method of *in situ* sterilization. To evaluate the efficiency of sterilization, surface samplings were carried out in the most critical areas of biofilm formation (lid, tubes, wall, impeller, and arrow), after fermentations of *E. coli* and *R. opacus*. The steam engine shown not to meet the goal of eliminating contamination, achieving 92% sterilization. However, the use of an autoclave allowed the expected sterilization performance, this was verified when simulating fermentation with sterile medium and not presenting contamination at the end of the test. The possibility of using pH, suspended solids and temperature sensors was determined, taking part of the medium for each repetition without contaminating of the system. In this way, a device capable of taking measurements by means of a microcontroller is introduced. To corroborate the functionality of the designed equipment, three fermentations were carried out with the *R. opacus* bacteria, where growth curves were obtained validating the operation of the design around the user and the process.

Introducción

CIBUS 3.0 es un emprendimiento que desarrolla microorganismos modificados genéticamente para facilitar la conversión de subproductos derivados de la agroindustria, en productos con valor agregado; por ejemplo, el uso de la bacteria *Rhodococcus opacus* PD630 como plataforma de producción de biodiésel a partir de suero lácteo. Para este fin se seleccionan y optimizan las rutas metabólicas más eficientes y convenientes, para su posterior aplicación a escala industrial. El escalamiento de dicho bioproceso implica la necesidad de diseñar un biorreactor con una configuración modular, capaz de monitorear las condiciones de crecimiento de forma automatizada, para facilitar la optimización del proceso de fermentación y la evaluación de la eficiencia de estas fermentaciones a una escala mayor.

La base de esta actividad económica es el proceso de fermentación, donde se consumen compuestos de alto valor energético (azúcares), obteniéndose sustancias simples, útiles para el metabolismo, por ejemplo, ácidos, gases y alcoholes [1]–[4]. Entre otras aplicaciones se encuentran la remoción de componentes indeseados [3] como por ejemplo reducción de Cr (VI) a Cr (III) en agua residual industrial [5], el consumo de fenantreno [6] y pesticidas [7], [8] por bioaumentación de microorganismos autóctonos y la producción de compuestos de alto valor económico como la vainillina [9], [10], ácido cítrico [11], [12], ácido glutámico [13], [14] e inhibidores enzimáticos [15].

Dentro de los parámetros que influyen en la eficiencia de los procesos de fermentación, y que por lo tanto deben ser controlados, se incluye el oxígeno disuelto [16], la temperatura [17], el pH [18], la composición del medio [19], la osmolaridad y la agitación [20]. Adicionalmente, se monitorean variables de respuesta como el crecimiento de biomasa, el rendimiento de producción del metabolito de interés y el consumo de sustrato [21]. Mientras avanza la investigación en este tema, se vuelve evidente la relevancia de aspectos como la estandarización, la optimización del rendimiento y la reducción en los costos [21]–[23].

Los procesos de fermentación se pueden llevar a cabo bajo tres modos de operación [24] cuya diferencia recae principalmente en la disposición del medio nutritivo durante el bioproceso [25]. Estas estrategias de producción corresponden a la alimentación discontinua también conocida como *batch process* (se realiza una única alimentación previa al bioproceso) [26], operación semicontinua o *fed-batch* (su alimentación posee una fuerte etapa previa seguida de aportes durante la fermentación) [27] y la continua o *continuous process* (presenta un flujo constante de medio durante todo el bioproceso) [28]. Estos sistemas cuentan, además, con métodos para su homogenización, mecanismos de agitación (tanque agitado) y de columnas dispensadoras de oxígeno sin agitación (*airlift* o columna de burbujas) [14], [29].

Rhodococcus opacus PD630 será utilizado como microorganismo de estudio para validar el funcionamiento del biorreactor diseñado. *Rhodococcus* es una bacteria, que se describe como nocardioforno aerobio, Grampositivo, no móvil, que contiene estructuras micelares [30], [31]. Este género se conoce por su capacidad de biorremediación [32], [33]. Además, es una plataforma biológica de producción para diversos productos en la industria [34], [35]. En específico *R. opacus* presenta la capacidad de degradar compuestos aromáticos, furanos y ácidos orgánicos. Se ha demostrado que es capaz de acumular triacilglicéridos (TAG) y moléculas precursoras de biodiésel [36], [37].

Este artículo tiene por objetivo el diseño y construcción de un biorreactor tipo tanque agitado para el crecimiento de *R. opacus* PD630 como organismo de interés, además de evaluar su funcionamiento en términos de capacidad de monitoreo de variables de flujo y agitación.

Metodología

Diseño y construcción

Se diseñó y construyó un biorreactor con una capacidad volumétrica total de 21.5 L. Para esto, los requerimientos del emprendimiento se resumen en los principios de: simplicidad de uso, modularidad, estética y ergonomía, las cuales se agruparon bajo el concepto de *principios del diseño*. Con el fin de desglosar el proceso, el biorreactor se clasificó en tres partes: tanque, tapa y dispositivo de medición de factores múltiples (DMFM).

Tanque del biorreactor

El diseño teórico del tanque se basó en la fórmula del volumen del cilindro, empleando 250 mm de diámetro. En función del diámetro, el volumen especificado se completó al asignar una altura de 500 mm, esto para cumplir con un espacio libre mínimo del 20% y una proporción de 1.6 (altura del medio/diámetro). Dada la necesidad de eliminar ángulos de 90°, la geometría del tanque, inicialmente cilíndrica, cambió a un fondo semiesférico. Esta variación implicó una reducción de 50 mm en la altura, para un valor final de 450 mm. Para la construcción del tanque y todas sus piezas, se empleó acero inoxidable 316L de 5 mm, además, se procuró que contara con esquinas redondeadas y paredes internas pulidas con un acabado de grado alimenticio. En la sección inferior del tanque se incorporó una válvula *check* de cobre con una boquilla personalizada, para el uso de un vaporizador de mano genérico importado de Los Estados Unidos, como propuesta de proceso de esterilización. Para facilitar la limpieza se colocó un desagüe en el fondo del tanque, el cual es un orificio de 10 mm con un tornillo para su cierre.

Tapa

Se diseñó una tapa de 310 mm de diámetro con 5 mm de grosor; dos perforaciones especiales para la trampa de gas 15 mm y para la termocupla de 25 mm. Asimismo, seis perforaciones de 10 mm de diámetro para la incorporación de los elementos requeridos para el funcionamiento del biorreactor: válvula de presión (forma segura de liberar la presión acumulada durante la esterilización propuesta), entrada y reincorporación de medio para su conexión con el DMFM, termo pozo, tubos auxiliares, flecha personalizable, mamparas y difusor de aire.

La configuración de la tapa fue determinada por los *principios del diseño* mencionados anteriormente. Estos se ven plasmados en la disposición espacial de cada uno de los elementos presentes, tanto sensores como flujos de entrada y salida de material. Así, en la tapa se delimitaron tres sectores donde se dispusieron cada uno de los elementos según su relación con el usuario y con el DMFM.

Para distribuir los elementos de cada sector, maximizando la distancia entre ellos, se usó la Ecuación 1.

$$\text{Grados de separación por pieza} = \frac{\text{cantidad de tubos por zona} + 1}{360^\circ \div 3}$$

Ecuación 1. Distancia en grados por pieza en cada sector.

Descripción de las piezas en la tapa:

- Mamparas: se incorporaron tres mamparas de acero inoxidable 316L rodeadas de una pieza sólida de teflón con el fin de eliminar la posibilidad de fugas. Su ángulo es ajustable y posee un área superficial de .

- Flecha: para conservar mayor personalización, la flecha presenta un largo genérico de 360 mm con 13 mm de diámetro. Se conectó con un sistema de rodamientos a un acople Lovejoy® tipo L-Jaw con araña de hule. En ella se ajustaron los impulsores por medio de un tornillo sin cabeza. Se opera por un motor de 110 V de potencia.
- Impulsores: se cuenta con dos impulsores, tipo propela marina, individuales y removibles de acero inoxidable. El diámetro de cada uno es de 125 mm, lo que representa la mitad del ancho del tanque.
- Difusor: se colocó un difusor de aire en forma de L de 500 mm de largo, con orificios a lo largo con una separación de 7.5 mm en el eje horizontal (que consta de 173.36 mm), presentes debajo del impulsor. El ingreso de aire se da por medio de una manguera con un filtro miliporo de 0.22 µm (Membrane Solutions Corp), permitiendo la introducción de aire ambiental filtrado.
- Tubos: se incorporaron tubos de acero inoxidable 316L de 5 mm de grosor con tres dimensiones diferentes (300 mm, 200 mm y 20 mm de largo). En la tapa, se presenta un tubo de 300 mm para salida de medio, dos tubos de 200 mm extensibles por medio de mangueras adicionales y tubos de 20 mm con un cono truncado de punta, diseñados para la adición controlada de sustancias.

DMFM

Se construyó un dispositivo de medición de factores múltiples (DMFM), externo al tanque. La construcción del DMFM se basó en una caja de aluminio con esquinas redondeadas. Además, se utilizaron empaques del estilo o'ring a la medida para poder introducir cada uno de los sensores a presión. Los sensores de pH, turbidez del medio y temperatura fueron conectados a un *Arduino Mega 2560 REV 3*, dispositivo en el cual se ejecutan las lógicas necesarias para llevar el control de la reacción respectiva, la toma de datos y el monitoreo del funcionamiento. Este dispositivo fue equipado con bombas peristálticas impulsadas con un motor tipo *Stepper* (24 V y 30 W, para un flujo desde 0 – 400 ml/min), con el fin de facilitar la transferencia del medio de cultivo desde el tanque.

Sensores

Las pruebas relacionadas con la calibración de los sensores se realizaron por medio del DMFM, donde se recopilaron los datos y se ajustaron a comportamientos esperados, como se detalla a continuación:

Sensor de pH

El sensor utilizado fue la versión genérica del *EZO Class pH*, presente en el *Kit Atlas Scientific*, con controlador para Arduino. Para calibrar el pHmetro, se utilizaron patrones estándar de buffers con pH 4, 10 y 7. Se realizaron mediciones seriales por segundo y se ajustó la sensibilidad del instrumento con una perilla incorporada en la tarjeta que conecta el sensor con el Arduino.

Sensor de transmitancia

Se empleó el sensor de transmitancia marca DFRobot Gravity® con controlador para Arduino, importado de Estados Unidos. Su registro es de partículas en suspensión o *Total Suspended Solids (TSS)*, el cual es un valor directamente proporcional al crecimiento de biomasa. Se verificó comparando los datos obtenidos durante el crecimiento de *R. opacus* y datos capturados por medio de medición de absorbancia, realizada durante las fermentaciones descritas más adelante.

Sensor de temperatura

El sensor de temperatura utilizado es la versión sumergible, modelo DS18B20, de SparkFun® de rango -55 °C a 125 °C con una fidelidad de ± 0.5 °C dentro del rango -10 °C a 85 °C. La verificación de su funcionamiento constó de mediciones constantes por parte del Arduino, contra mediciones tomadas a mano desde el termo pozo del biorreactor durante 15 min. Para estas mediciones, se usó un termómetro de inmersión graduado estándar.

Optimización del proceso de esterilización

Se realizó una fermentación con un cultivo de *R. opacus* y otro de *E. coli* en 15 L de agua con azúcar de mesa Doña María® a una concentración 20 g/L durante tres días con 3 repeticiones. Posteriormente se aplicó el procedimiento de limpieza y esterilización, el cual constó de tres fases: Limpieza gruesa, Exposición Química y Exposición a factores físicos. Para la Limpieza gruesa, se utilizó *Jabón Lavatrastes Axiom antigrasa* en formato líquido, cubriendo todas las superficies y posteriormente se restregó. En la Exposición Química, el tanque se roció con el desinfectante Swipol® Amonio Cuaternario de cuarta generación, a una proporción 1:20 en agua. Por último, para la Exposición a factor físico, el biorreactor se expuso a vapor de agua durante 50 min (dos ciclos de 25 min cada uno) aproximadamente 200 ml por ciclo empleando un vaporizador de mano genérico.

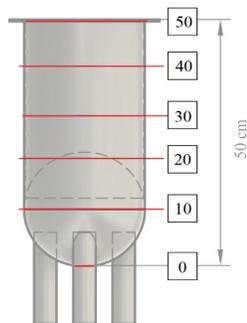


Figura 1. Esquema de alturas de control de temperatura.

Durante la exposición al vapor, se monitoreó la temperatura, cada 5 min, en diferentes alturas del tanque, con un termómetro de escala estándar en la parte externa. Se marcó, tomando la base del tanque como punto de inicio, donde se colocaron 4 puntos cada 10 cm hasta llegar a la tapa (figura 1).

Muestreo superficial

Con una plantilla hecha con cinta de enmascarar de 5 cm² se muestreó el tubo, la pared, el impulsor, la tapa y la flecha, antes y después del proceso de esterilización, en aquellos puntos donde se observó mayor deposición de microorganismos. Las muestras se recuperaron con una tundra estéril previamente remojado en 1 ml de buffer de fosfatos (PBS) 0.1 M. Cada muestra se resuspendió en 10 ml de PBS agitando durante 1 min. Finalmente, se prepararon diluciones seriadas (10^{-5}) que fueron plaqueadas por triplicado; las placas se incubaron a 30 °C.

Uso del tanque

Montaje del tanque

En cuanto a la preparación previa al montaje, el procedimiento inició tomando en cuenta los requerimientos de cada una de las piezas con el fin de brindar una vida útil mayor al biorreactor. Así, las piezas sensibles a temperatura (mangueras usadas por las bombas peristálticas y el adaptador del sensor de transmitancia) se colocaron previamente en cloro al 30%, *overnight*. Para las piezas resistentes a la temperatura (autoclavables), se realizó el proceso de autoclavado. Las mangueras autoclavables se seleccionaron con el cumplimiento de los estándares de la FDA (fda 21 cfr 177.2600), según el fabricante.

Se acoplaron todas aquellas mangueras que interactúan con el medio al biorreactor, previo al proceso de esterilización. Estas piezas corresponden a las mangueras de extracción del DMFM y la manguera de introducción del medio en los acoples de la tapa, mencionados en la sección anterior sobre las piezas de la tapa. Luego, se esterilizó el DMFM con la manguera de introducción (conectado a la manguera propia de la bomba peristáltica) y con la manguera de salida (conectado al tanque durante el montaje); ambas se instalaron previo al proceso de autoclavado. Para cada una de estas piezas se usó papel aluminio para proteger los extremos. De igual manera, se autoclavó la botella de toma de muestra y el adaptador del difusor de aire. El medio de cultivo se esterilizó por aparte, en una botella Pyrex®™ de 20 L. y luego se conectó a la tapa por medio de la tapa personalizada (figura 2) para el tanque con la manguera de silicón, y se aseguró con prensas.

Para proceder con el montaje, se tomó la botella con el medio de cultivo autoclavado y, en caso de ser requerido, se le agregó el inóculo. Luego se conectó a la manguera de la bomba peristáltica previamente bañada en alcohol de 95% v/v, con un mechero dentro del área aséptica. Este procedimiento se realizó para la conexión del DMFM, la botella de toma de muestra y el adaptador del difusor de aire. Seguidamente se colocaron filtros en los extremos expuestos de las tapas personalizadas.

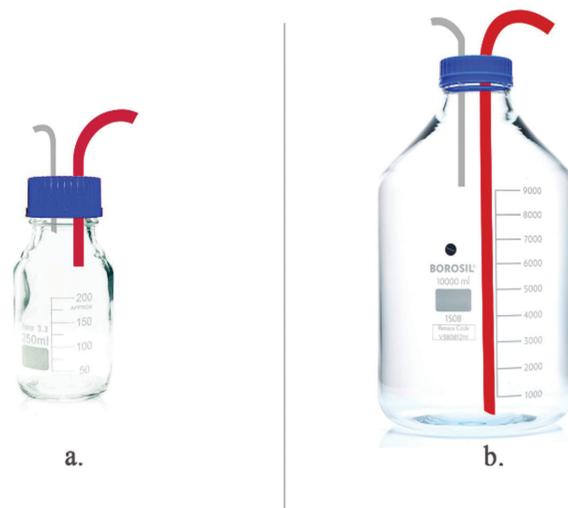


Figura 2. Ilustración de tapas personalizada. a. Toma de muestra; b. Botella de medio.

Para finalizar, se acoplaron las bombas peristálticas e inició el sistema de ingreso del medio previamente inoculado. Una vez terminado el llenado del tanque, se procedió a instalar el difusor de aire, y el DMFM para iniciar el sistema completo.

Desmontaje del bioproceso

Para el desmontaje, primero se detuvo el sistema DMFM, la agitación, la aireación y la ventilación del motor. Seguidamente, se abrió el desagüe de la parte inferior del tanque, para extraer toda la fermentación y, una vez vaciado el tanque, se lavó para su almacenaje como se describió en limpieza gruesa.

Simulación de un bioproceso

Se preparó el tanque como ha sido indicado en la sección anterior, con 10 L de agua con azúcar (50 g/L) como medio de cultivo, sin inóculo. Además, se preparó un cultivo de 100 ml de *E. coli* y otro de 100 ml de *R. opacus*, utilizando una colonia de placa brindada por la empresa. Transcurridos 3 días, se verificó visualmente la ausencia de crecimiento dentro del tanque y el crecimiento de los cultivos de *E. coli* y *R. opacus*. Se realizaron tres repeticiones del experimento.

Bioproceso

Se preparó un inóculo de 15 ml utilizando medio definido con buffer de fosfatos (*phosphate-buffered defined medium*; PBD) [38] que fue inoculado con 1 ml de *R. opacus* en glicerol (20% v/v) a 28 °C. Luego de incubar *overnight*, este inóculo fue aforado a 150 ml y se repitió la incubación a 28 °C. Posteriormente, se aforó hasta un volumen de 1.5 L, seguido de una última incubación a temperatura ambiente. A partir de este inóculo, se realizó una fermentación de 15 L, empleando como medio de cultivo agua suplementada con azúcar (40 g/L). La fermentación se llevó a cabo durante 5 días y se realizaron tres repeticiones. Se tomaron muestras dos veces al día, a las 8:00 y a las 20:00 h durante el tiempo de fermentación, empezando por tiempo 0. Se determinó la densidad óptica a las muestras, por medio del espectrofotómetro *UV/VIS Spectrophotometer T6U*® a una longitud de onda de 660 nm.

Resultados y discusión

Diseño y construcción

El diseño se basó en la necesidad establecida por la empresa (*Cibus 3.0*). Para esto se usó el concepto de modularidad que le permite al sistema agilidad frente a los cambios y ahorro en altos costos debido a nuevos ajustes [39], [40]. En total el equipo cuenta con tres módulos ajustables e independientes entre sí, estandarizados para su reemplazo: el tanque, la tapa y el DMFM.

Tanque

Se decidió diseñar el equipo en acero 316L ya que es un material utilizado en el procesamiento de alimentos, cuenta con resistencia a temperatura hasta 450 °C y mayor rendimiento en acabados por soldadura (Australian Stainless Steel Development Association (ASSDA)[41]). El diseño se consolidó en un cilindro con fondo semiesférico para eliminar las esquinas donde inicialmente fue plano (figura 3) esto con el fin de facilitar la construcción y permitir mayor flujo dentro del tanque. Con un volumen total de 21.5 L, el tanque tiene una altura de 414.74 mm y un diámetro de 249.74 mm (figura 4). Este cálculo se rige por la relación 1.6 necesaria para promover un mayor contacto con el oxígeno entrante en el medio [42].

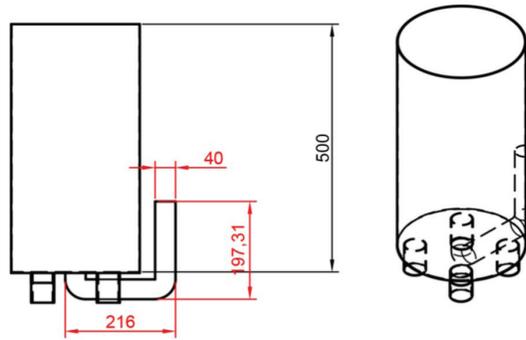


Figura 3. Medidas teóricas previo a la construcción(mm).

Además, la relación facilita la transferencia de calor durante el proceso, debido a que cuanto mayor sea la relación de altura y diámetro, mayor será el área de transferencia de temperatura [43], [44]. El volumen de trabajo (17 L) abarca un 80% del volumen total de biorreactor. El restante 20% de espacio es recurrente en los biorreactores para que, en caso de formación de espuma, no llegue a la tapa inmediatamente [43].

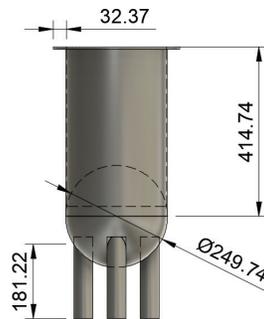


Figura 4. Dimensiones (mm) finales del biorreactor una vez construido.

Tapa

Los elementos dentro de la tapa se distribuyeron por medio de la Ecuación 1, lo que permitió aprovechar al máximo el espacio entre cada uno de los componentes, como se observa en la figura 5, brindándole al usuario el mayor espacio posible para manipular cada una de las conexiones del sistema.

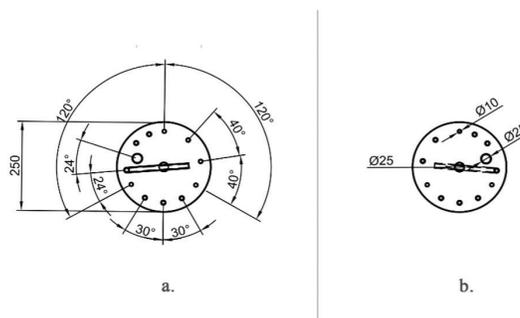


Figura 5. Dimensiones (mm) de la tapa: a. Distribución espacial de los elementos de la tapa. b. Medidas de elementos de la tapa.

Como parte de los *principios del diseño*, el entendimiento del proceso es crucial para un diseño basado en los usuarios [45], por lo que la distribución espacial de las piezas en la tapa se divide en 3 zonas de interacción con el usuario:

- i. Alta relación con el DMFM (Fig. 6 (a)); este sector se caracteriza por contar con aquellas entradas y salidas que tienen contacto con el microcontrolador. Estas partes comparten la cualidad de ser instaladas y no volverse a modificar durante la corrida. Se colocaron los elementos que requieren de una conexión por medio de mangueras a una bomba peristáltica y el termo pozo.
- ii. Alta relación con el usuario (Fig. 6 (b)); esta disposición del espacio posee aquellas partes donde el usuario puede intervenir, y donde tiene mayor acceso. Estas partes son manipulables por el usuario al menos una vez durante la corrida, de esta manera la intervención será segura. Se situaron los tubos internos correspondientes a la toma de muestra, un puerto de adición y un tubo auxiliar.
- iii. Contacto mínimo (Fig. 6 (c)); estas piezas funcionan como elementos completamente independientes cuya manipulación no es recomendable. Se ubicó la válvula de seguridad para expulsar la presión. Además, se incorporó un orificio en la tapa con forma de tuerca, donde se ajusta a una trampa de gas comercial distribuida principalmente en tiendas de producción casera de cerveza.

Esta estructuración de los elementos de la tapa permitió mayor facilidad para la manipulación del biorreactor, debido a la cercanía de los elementos al microcontrolador. De esa manera se cuenta con mayor orden en las conexiones electrónicas. Por otro lado, el diseño de las alturas de los tubos de la tapa (figura 7) permiten un funcionamiento correcto de los elementos del tanque en conjunto al microcontrolador. Esta configuración inicial, sin embargo, debido a la modularidad del sistema es reemplazable por un sistema nuevo. Permitiendo tener respuesta ante las necesidades de la empresa.

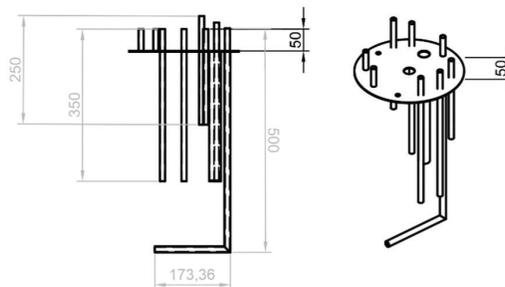


Figura 7. Dimensiones (mm) de la tapa: a. Longitud de los tubos en la tapa. b. Vista ortogonal: distribución de los elementos verticales en la tapa.

DMFM

Su construcción se basó en la durabilidad del sistema completo siguiendo los *principios del diseño*. Para esto, se construyó un módulo de menor costo (figura 8) donde se encuentren las piezas con menor resistencia y durabilidad, con el fin de evitar eliminar por completo el producto en caso de reemplazo de un sensor discontinuado.

En otras áreas se ha evaluado el concepto de modularidad como herramienta para vencer la obsolescencia, por ejemplo, Hirose & Mishima [46], analizan el concepto de modularidad tomando en cuenta las actualizaciones que conlleva un producto y el peso de las preferencias del usuario frente a la obsolescencia. Como solución, se planteó enfocar este factor en piezas

individuales distribuyendo los procesos en cada una de las partes del biorreactor (Fermentación, Tanque; Control de Condiciones, DMFM; Configuración de los elementos del Tanque; Tapa), por lo que no será necesario reemplazar completamente el equipo en caso de cambios. De esta manera, se posibilita la futura construcción de otros DMFM bajo demanda, según el proceso y la etapa que se lleve a cabo, removiendo la necesidad de construir un nuevo biorreactor para nuevos requerimientos de sensibilidad.

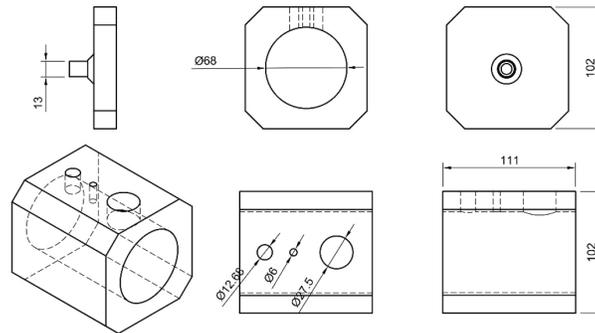


Figura 8. Dimensiones (mm) del DMFM.

Pruebas de esterilización

El proceso de esterilización es un criterio importante para el diseño y funcionalidad de un biorreactor. La importancia se centra en mantener el cultivo puro durante la fermentación [47], por lo que el diseño contempla la posibilidad de ingresar vapor de agua por medio de un vaporizador de mano genérico, facilitando la esterilización *in situ*. Para medir la eficiencia de esta metodología, se monitoreó la temperatura del tanque durante la exposición a vapor y su eficiencia en la inhibición de crecimiento de contaminantes. El monitoreo de la temperatura (figura 9) evidenció fluctuaciones en la distribución del calor. Las mediciones no se mantienen entre las repeticiones, esto se observa como un bajo rendimiento, donde la segunda repetición presenta temperaturas menores a los 40 °C en contraste a la segunda repetición donde la temperatura mayor es de 57 °C. Sin embargo, el tiempo de exposición a altas temperaturas no es constante.

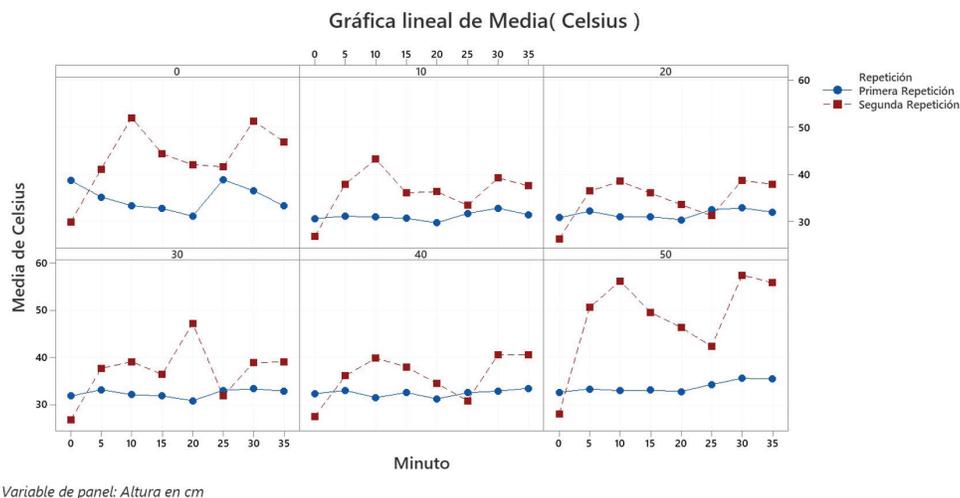


Figura 9. Comportamiento de la temperatura en el tiempo, según la altura, durante el proceso de esterilización por vapor.

Al comparar las temperaturas máximas alcanzadas en cada altura evaluada, se observó que el mayor valor, 57 °C se obtuvo en la tapa (50 cm). Es posible que esta distribución del calor se deba a que el diseño cuenta con la entrada de vapor justo debajo de los accesorios de la tapa, los cuales perciben el calor al ingreso del vapor (sección 50 cm).

La temperatura no fue constante durante el tiempo de exposición, dando como resultado fluctuaciones en ambas repeticiones, donde no son comparables las gráficas (figura 9). Las fluctuaciones descritas anteriormente también podrían asociarse con en el funcionamiento del vaporizador, ya que este no cuenta con ningún mecanismo que asegure una temperatura constante. El comportamiento fluctuante de diferencias de hasta ± 20 °C no permite fidelidad para un proceso con requerimientos de mayor estándar.

La cuantificación de la carga microbiana antes y después del proceso de esterilización facilitó el cálculo de la eficiencia del proceso por pieza muestreada (figura 10). Así, se muestra como resultado un promedio de eficiencia del 92%. Sin embargo, al analizar el resultado por pieza, se evidencia que, en la tapa, donde la eficiencia fue la menor observada, se alcanzó fue 85%, equivalente a un promedio de 31 UFC/5 cm² con una desviación estándar de 54.4 UFC/5 cm². El área interna del biorreactor es de aproximadamente 7.3×10^3 cm² por lo que esta contaminación significaría $4.5 \times 10^4 \pm 7.9 \times 10^4$ UFC al iniciar la reacción.

Según Shih *et al.* [48] la temperatura ideal está en el rango de 121-134 °C como estándar en esterilización. Por lo tanto, al verificarse durante el monitoreo que la máxima temperatura alcanzada fue 57 °C, es posible atribuir la aparente reducción de contaminación a la aplicación del desinfectante basado en amonio cuaternario aplicado en la etapa química de la limpieza (Swipol). Según el documento facilitado por el proveedor HomeCare [49], el producto posee Cloruro de Dimetil Bencil Amonio en una concentración de 1 - 3.5% tras preparación 1:20 de agua. Espinoza & Danilo [50] reportan, a una concentración de 0.33% de Cloruro de Dimetil Bencil, una eficiencia germicida frente a *E. coli* de 99.775% tras 30 segundos de exposición, cuantificado según la metodología AOAC 960.09. Dado que los estudios realizados por la empresa son para evaluar microorganismos genéticamente modificados, se debe procurar la maximización de la eficiencia del proceso de esterilización, por lo que la aplicación de este método fue desestimada. Debido a esto, para las siguientes pruebas se realizan esterilizaciones por medio de autoclave.

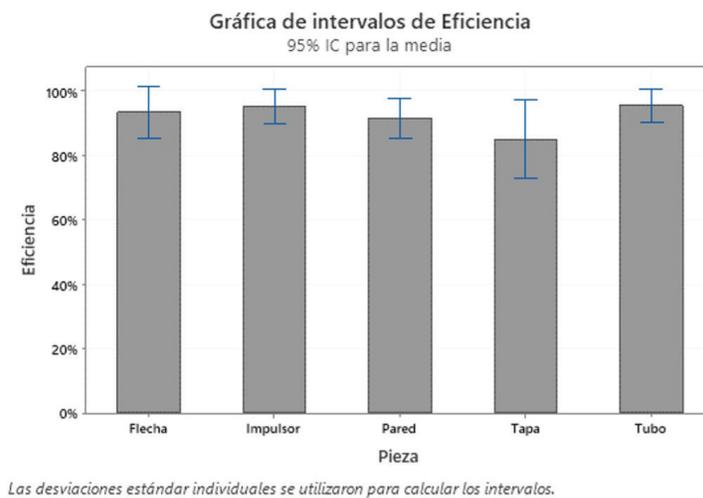


Figura 10. Eficiencia del proceso de esterilización.

Simulación de un bioproceso

Luego de tres ejecuciones de procesos libres de microorganismos introducidos se determinó que durante la ejecución del biorreactor no hay contaminación cruzada. No se evidenció crecimiento en ninguna de las repeticiones. Por lo que se determina la posibilidad de utilizar este método de esterilización como parte del proceso. Además, el resultado la calidad hermética del diseño al no ingresar contaminantes.

Uso del tanque

El diseño presenta un montaje sencillo debido a la facilidad de limpieza del diseño con bordes redondeados. Su montaje incorpora al microprocesador y como se explicó anteriormente, como resultado el diseño permite capturar datos, agitar y airear el sistema manteniendo la inocuidad. El sistema en su montaje (figura 11) presenta las etapas previsualizadas en los planos, descentralizando las funciones en cada una de las partes permitiendo modularidad. Se determina que el diseño no presenta fugas al realizar un montaje correcto.



Figura 11. Fotografía del tanque montado.

Bioproceso

Se realizaron tres fermentaciones con *R. opacus* (figura 12). Se observa en la curva correspondiente a la repetición 1, un periodo de latencia hasta aproximadamente las 14 h, a partir del cual inicial la fase exponencial que se extiende hasta las 64 h, donde comienza la fase estacionaria. La repetición 2 muestra un comportamiento similar al obtenido en la repetición 1. La tercera curva de crecimiento exhibe una fase mayor de latencia de 60 h, donde seguidamente entra en fase exponencial. La tercera curva presenta un mayor periodo de adaptación al medio, el cual está constituido por 40 g/L de azúcar, al no tener condiciones específicas el rendimiento de biomasa durante el crecimiento del inoculo en PBD es un factor determinante para la fase de adaptación del microorganismo debido al cambio de composición a un medio con solo fuente de carbono adicionada. Pese a la diferencia entre las cinéticas de crecimiento obtenidas, el resultado valida la capacidad del biorreactor de contener una fermentación, debido al aumento de luz absorbida en el transcurso de 3 a 6 días.

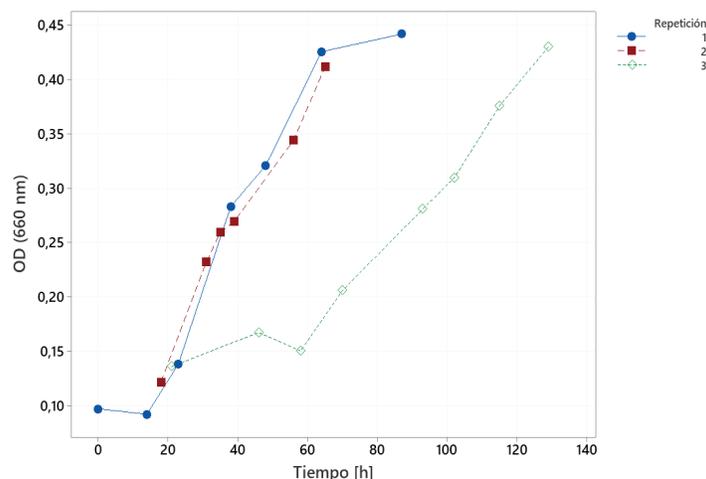


Figura 12. Curvas de crecimiento de *R. opacus*.

Para la comprobación del sensor de transmitancia se tomaron los datos de la primera fermentación. Debido a que el sistema no posee un módulo de medición de tiempo se asignó un intervalo numérico consecutivo. La figura 13 presenta los datos obtenidos, donde se observa una distribución creciente en el tiempo. Es importante mencionar que el sensor presenta una constante desconexión, la cual se refleja en la acumulación de datos en zonas más oscuras cercanas al valor 2. Esto concuerda con la alta exposición a movimiento mecánico generado por los motores dentro del sistema.

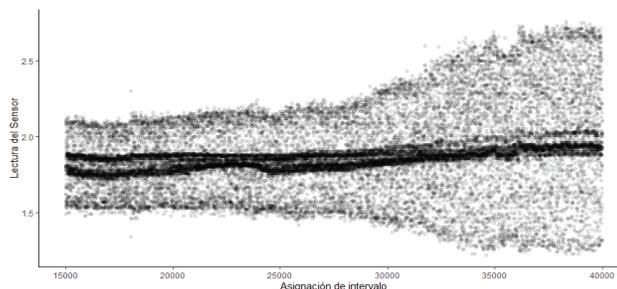


Figura 13. Curvas de crecimiento de *R. opacus* realizada por el sensor incorporado.

La presencia de ruido en la data recolectada se debió a variaciones de voltaje no relacionadas con la medición, comúnmente esto está relacionado a la configuración de los pines en el instrumento de prototipado (*proto board*) por lo que es necesaria la fabricación de una placa PCB donde las conexiones sean soldadas a la placa [51]. Además, debido a que en cada experimento se generan altas vibraciones dado a la acción de los motores, se encuentra el requerimiento de migración del prototipo.

Conclusiones

Se propuso una metodología de esterilización *in situ* de bajo costo, usando equipo comercial y, al evaluar su funcionamiento, se logró concluir que el sistema de esterilización planteado no es recomendable para la empresa debido a la fluctuación de temperatura y porcentaje de eficiencia del 92%. Sin embargo, el uso de autoclave para esterilización presenta el rendimiento necesario para la empresa. Se determina la permanencia del estado de inocuidad a lo largo del proceso, ya que no presentó contaminación en las pruebas de medio estéril. De esta manera se

establece la posibilidad de capturar los datos, por medio de microcontrolador, de la reacción (pH, Crecimiento y Temperatura) extrayendo medio del sistema y realizando el muestreo *ex situ* sin contraminar la fermentación. Con esto datos se demuestra que el tanque es capaz de brindar las condiciones para el cultivo de *R. opacus*, según las curvas de crecimiento. Con éxito se establece las bases para la construcción de un biorreactor con concepto modular asistido por microcontrolador para el crecimiento de *R. opacus*, con la capacidad de reproducir el diseño para los biorreactores que sean necesarios en el futuro.

Referencias

- [1] J. S. Alford, "Bioprocess control: Advances and challenges," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 30, no. 10–12, pp. 1464–1475, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.compchemeng.2006.05.039.
- [2] A. Kumar Das and R. Mohanty, "A Review on the Production and Optimal Use of Ethyl Alcohol as a Surrogate Fuel in IC Engines Extracted From Organic Materials," *Indian J.Sci.Res*, vol. 15, no. 2, pp. 46–52, 2017, Accessed: Dec. 21, 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320623386>.
- [3] F. Muhammad Anjum, R. Muhammad Amir, and M. Rafiq Khan, "An overview of anti-nutritional factors in cereal grains with special reference to wheat-A review," 2010, Accessed: Dec. 21, 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/233816063>.
- [4] L. Thi Tam, Y. Jun, and L. MinWon, "Anti-Inflammatory and Anti-Oxidative Activities of Phenolic Compounds from *Alnus sibirica* Stems Fermented by *Lactobacillus plantarum* subsp. *argentoratensis*," *Molecules*, vol. 22, no. 9, p. 1566, Sep. 2017, doi: 10.3390/molecules22091566.
- [5] S. Xia *et al.*, "A critical review on bioremediation technologies for Cr(VI)-contaminated soils and wastewater," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 49, no. 12, pp. 1027–1078, Jun. 2019, doi: 10.1080/10643389.2018.1564526.
- [6] Ł. Ławniczak, M. Woźniak-Karczewska, A. P. Loibner, H. J. Heipieper, and Ł. Chrzanowski, "Microbial Degradation of Hydrocarbons—Basic Principles for Bioremediation: A Review," *Molecules*, vol. 25, no. 4, p. 856, Feb. 2020, doi: 10.3390/molecules25040856.
- [7] Y. W. Chin, W. K. Kang, H. W. Jang, T. L. Turner, and H. J. Kim, "CAR1 deletion by CRISPR/Cas9 reduces formation of ethyl carbamate from ethanol fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 43, no. 11, pp. 1517–1525, Nov. 2016, doi: 10.1007/s10295-016-1831-x.
- [8] S. Jaiswal, D. K. Singh, and P. Shukla, "Gene editing and systems biology tools for pesticide bioremediation: A review," *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, no. FEB, p. 87, Feb. 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.00087.
- [9] G. Banerjee and P. Chattopadhyay, "Vanillin biotechnology: the perspectives and future," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 99, no. 2, pp. 499–506, Jan. 2019, doi: 10.1002/jsfa.9303.
- [10] L. Londoño-Hernandez, G. Bolívar, and C. Ramírez, "Effect of solid state fermentation with *Rhizopus oryzae* on biochemical and structural characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench)," *Intl. J. Food. Ferment. Technol*, vol. 8, no. 1, pp. 27–36, 2018, doi: 10.30954/2277-9396.01.2018.4.
- [11] E. Carsanba, S. Papanikolaou, P. Fickers, B. Agirman, and H. Erten, "Citric Acid Production by *Yarrowia lipolytica*," in *Non-conventional Yeasts: from Basic Research to Application*, Springer International Publishing, 2019, pp. 91–117.
- [12] D. A. Rzechonek, A. Dobrowolski, W. Rymowicz, and A. M. Mirończuk, "Aseptic production of citric and isocitric acid from crude glycerol by genetically modified *Yarrowia lipolytica*," *Bioresource Technology*, vol. 271, pp. 340–344, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.118.
- [13] M. Cao, J. Feng, S. Sirisaneeyakul, C. Song, and Y. Chisti, "Genetic and metabolic engineering for microbial production of poly-γ-glutamic acid," *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 5. Elsevier Inc., pp. 1424–1433, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.05.006.
- [14] S. Sirisaneeyakul, M. Cao, N. Kongklom, C. Chuensangjun, Z. Shi, and Y. Chisti, "Microbial production of poly-γ-glutamic acid," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 33, no. 9. Springer Netherlands, Sep. 2017, doi: 10.1007/s11274-017-2338-y.
- [15] A. Schievano *et al.*, "Electro-Fermentation – Merging Electrochemistry with Fermentation in Industrial Applications," *Trends in Biotechnology*, vol. 34, no. 11. Elsevier Ltd, pp. 866–878, Nov. 01, 2016, doi: 10.1016/j.tibtech.2016.04.007.
- [16] M. Tolosa, W. Chandler, D. Koebler, J. Cremonese, and B. March, "Apparatus for Detecting pH and Dissolved Oxygen US20190250103A1," 2019. Accessed: Feb. 01, 2020. [Online].



- [17] D. K. Rajan *et al.*, "Monitoring pH, temperature and humidity in long-term stem cell culture in CO₂ incubator," in *2017 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2017 - Proceedings*, Jul. 2017, pp. 470–474, doi: 10.1109/MeMeA.2017.7985922.
- [18] C. McBeth, R. al Dughaishi, A. Paterson, and D. Sharp, "Ubiquinone modified printed carbon electrodes for cell culture pH monitoring," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 113, pp. 46–51, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.bios.2018.04.052.
- [19] E. P. Solomon, L. R. Berg, and D. W. Martin, *Biología (9a. ed.)*, vol. Novena Edi. CENGAGE Learning, 2013.
- [20] A. M. Vazquez-Marquez *et al.*, "Effect of stirring speed on the production of phenolic secondary metabolites and growth of *Buddleja cordata* cells cultured in mechanically agitated bioreactor," *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 139, no. 1, pp. 155–166, Oct. 2019, doi: 10.1007/s11240-019-01673-9.
- [21] P. O'Mara, A. Farrell, J. Bones, and K. Twomey, "Staying alive! Sensors used for monitoring cell health in bioreactors," *Talanta*, vol. 176. Elsevier B.V., pp. 130–139, Jan. 01, 2018, doi: 10.1016/j.talanta.2017.07.088.
- [22] A. ; Hasanzadeh, H. ; Junicke, and K. v Gernaey, "General rights Electrochemical biosensors for in-situ monitoring of stress responses in large bioreactors," 2019. Accessed: Dec. 27, 2019. [Online].
- [23] C. Klinger and U. Becken, "PH Sensor Recalibration Based on Exhaust CO₂ Concentration," *Genetic Engineering and Biotechnology News*, vol. 38, no. 15, pp. 24–25, Sep. 2018, doi: 10.1089/gen.38.15.07.
- [24] N. Udom, P. Chansongkrow, V. Charoensawan, and C. Auesukaree, "Coordination of the cell wall integrity and highosmolarity glycerol pathways in response to ethanol stress in *Saccharomyces cerevisiae*," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 85, no. 15, 2019, doi: 10.1128/AEM.00551-19.
- [25] C. L. Cooney, "Bioreactors: Design and operation," *Science*, vol. 219, no. 4585. pp. 728–733, 1983, doi: 10.1126/science.219.4585.728.
- [26] D. Soletto, L. Binaghi, A. Lodi, J. C. M. Carvalho, and A. Converti, "Batch and fed-batch cultivations of *Spirulina platensis* using ammonium sulphate and urea as nitrogen sources," *Aquaculture*, vol. 243, no. 1–4, pp. 217–224, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.aquaculture.2004.10.005.
- [27] N. Pérez-Rodríguez, R. Pinheiro de Souza, A. M. Torrado, and J. M. Domínguez, "Ferulic acid transformation into the main vanilla aroma compounds by *Amycolatopsis* sp. ATCC 39116," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 100, no. 4, pp. 1677–1689, Feb. 2016, doi: 10.1007/s00253-015-7005-3.
- [28] S. Liu, *Bioprocess Engineering: Kinetics, Sustainability, and Reactor Design: Second Edition*. Elsevier Inc., 2016.
- [29] G. T. Benz, "Bioreactor Design for Chemical Engineers - BioreactorDesignForChEs.pdf," no. August, pp. 21–26, 2011.
- [30] W. R. Finnerty, "The Biology and Genetics of the Genus *Rhodococcus*," *Annual Review of Microbiology*, vol. 46, no. 1, pp. 193–218, Oct. 1992, doi: 10.1146/annurev.mi.46.100192.001205.
- [31] M. Majidzadeh and M. Fatahi-Bafghi, "Current taxonomy of *Rhodococcus* species and their role in infections," *European Journal of Clinical Microbiology and Infectious Diseases*, vol. 37, no. 11. Springer Verlag, pp. 2045–2062, Nov. 01, 2018, doi: 10.1007/s10096-018-3364-x.
- [32] S. R. Subashchandrabose, K. Venkateswarlu, R. Naidu, and M. Megharaj, "Biodegradation of high-molecular weight PAHs by *Rhodococcus wratislaviensis* strain 9: Overexpression of amidohydrolase induced by pyrene and BaP," *Science of the Total Environment*, vol. 651, pp. 813–821, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.192.
- [33] S. R. Subashchandrabose, K. Venkateswarlu, K. Krishnan, R. Naidu, R. Lockington, and M. Megharaj, "Rhodococcus wratislaviensis strain 9: An efficient p-nitrophenol degrader with a great potential for bioremediation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 347, pp. 176–183, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.12.063.
- [34] W. E. Anthony *et al.*, "Development of *Rhodococcus opacus* as a chassis for lignin valorization and bioproduction of high-value compounds," *Biotechnology for Biofuels*, vol. 12, no. 1. BioMed Central Ltd., pp. 1–14, Aug. 05, 2019, doi: 10.1186/s13068-019-1535-3.
- [35] J. Czajka, Q. Wang, Y. Wang, and Y. J. Tang, "Synthetic biology for manufacturing chemicals: constraints drive the use of non-conventional microbial platforms," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 101, no. 20. Springer Verlag, pp. 7427–7434, Oct. 01, 2017, doi: 10.1007/s00253-017-8489-9.
- [36] M. S. Kuyukina and I. B. Ivshina, "Application of *Rhodococcus* in Bioremediation of Contaminated Environments," 2010, pp. 231–262.
- [37] G. W. Roell *et al.*, "A concerted systems biology analysis of phenol metabolism in *Rhodococcus opacus* PD630," *Metabolic Engineering*, vol. 55, pp. 120–130, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ymben.2019.06.013.

- [38] K. Kurosawa, P. Boccazzi, N. M. de Almeida, and A. J. Sinskey, "High-cell-density batch fermentation of *Rhodococcus opacus* PD630 using a high glucose concentration for triacylglycerol production," *Journal of Biotechnology*, vol. 147, pp. 212–218, 2010, doi: 10.1016/j.jbiotec.2010.04.003.
- [39] E. Bonilla-Pastor, "Diseño de un sistema de producción modular en una mediana empresa de confecciones," *Universidad de Lima*, vol. 0, no. 025, p. 11, 2007, doi: 10.26439/ing.ind2007.n025.607.
- [40] F. K. Pil and S. K. Cohen, "Modularity: Implications for imitation, innovation, and sustained advantage," *Academy of Management Review*, vol. 31, no. 4, pp. 995–1011, 2006, doi: 10.5465/AMR.2006.22528166.
- [41] Australian Stainless Steel Development Association (ASSDA), "316: The First Step Up," 2020. <https://www.assda.asn.au/technical-info/grade-selection/316-the-first-step-up> (accessed Mar. 30, 2020).
- [42] A. van Heiningen, D. Krothapalli, J. Genco, and A. Justason, "A chemical reactor analysis of industrial oxygen delignification," *Pulp and Paper Canada*, vol. 104, no. 12, pp. 96–101, 2003.
- [43] G. D. Najafpour, "Bioreactor Design," in *Biochemical Engineering and Biotechnology*, Elsevier, 2007, pp. 142–169.
- [44] L. J. Shah, "Heat transfer correlations for vertical mantle heat exchangers," *Solar Energy*, vol. 69, no. SUPPLEMENT, pp. 157–171, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(01)00039-1.
- [45] K. Thoring and R. M. Müller, "Understanding Design Thinking: A Process Model Based On Method Engineering," 2011. Accessed: Nov. 09, 2020. [Online]. Available: <https://www.designsociety.org/publication/30932/Understanding+Design+Thinking%3A+A+Process+Model+based+on+Method+Engineering>.
- [46] K. Hirose and N. Mishima, "Eco-efficiency evaluation of modular design smartphones," in *Procedia CIRP*, Jan. 2019, vol. 84, pp. 1054–1058, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.189.
- [47] H. A. Ruíz-Leza, R. M. Rodríguez-Jasso, R. Rodríguez-Herrera, J. C. Contreras-Esquivel, and C. N. Aguilar, "Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 6, pp. 33–40, 2007, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62060105>.
- [48] C. C. Shih, Y. Y. Su, L. C. Chen, C. M. Shih, and S. J. Lin, "Degradation of 316L stainless steel sternal wire by steam sterilization," *Acta Biomaterialia*, vol. 6, no. 6, pp. 2322–2328, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.actbio.2009.12.026.
- [49] HomeCare, "Hoja de seguridad del producto Swipe Swipol," 2017. https://www.jomsmx.com.mx/index.php/insumos/sanitizantes/product/download/file_id-1515 (accessed Nov. 10, 2020).
- [50] P. Espinoza and B. Danilo, "Elaboración de un plan maestro de desinfección para la empresa de deshidratados Criswils," Quito: UCE, 2019.
- [51] C. T. Obe1, S. E. Oti2, C. U. Eya3, D. B. N. Nnadi, and O. E. Nnad, "A LOW-COST PRINTED CIRCUIT BOARD DESIGN TECHNIQUE AND PROCESSES USING FERRIC CHLORIDE SOLUTION | Nigerian Journal of Technology," 2020, Accessed: Nov. 12, 2020. [Online]. Available: <http://nijotech.com/index.php/nijotech/article/view/2467>.

Síntomas del amachamiento del frijol común

Symptoms of common bean “amachamiento”

Rubén Calderón-Cerdas¹, Carlos Manuel Araya-Fernández²

Fecha de recepción: 24 de junio de 2021

Fecha de aprobación: 6 de setiembre de 2021

Calderón-Cerdas, R; Araya-Fernández, C.M. Síntomas del amachamiento del frijol común. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 158-166.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5716>

1 Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: racalderon@itcr.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-2791-0106>

2 Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. Costa Rica. Correo electrónico: carlosmanuel.araya@gmail.com

Palabras clave

Falsa mancha angular; nematodo foliar; *Aphelenchoides besseyi*; *Phaseolus vulgaris*.

Resumen

El amachamiento del frijol es provocado por el nematodo foliar *Aphelenchoides besseyi* Christie. Esta enfermedad puede ser reconocida a través de los síntomas de necrosis angular, deformación foliar, senectud tardía y ausencia de vainas. Inicialmente, se le denominó “falsa mancha angular” a los síntomas de necrosis angular. Además, de manera errónea, la deformación foliar fue diagnosticada como un ataque viral. Ante tal ambigüedad, este trabajo establece y describe los síntomas del amachamiento del frijol común. Con base en la literatura, trabajo de campo y experiencia de los productores de frijol, se analizó el tejido de frijol para describir los síntomas del amachamiento. Entre 2014 y 2015, se visitaron 24 fincas ubicadas dentro del territorio de Costa Rica (Provincias de San José y Puntarenas), de cada finca se colectó material vegetal. La deformación foliar es el síntoma predominante, presente en el 83% de las plantas; mientras que la necrosis angular en el 45% de las plantas con amachamiento. La disminución en la cantidad de vainas fue del 46% con respecto a plantas sanas. Por su parte, las plantas con amachamiento senescieron de manera tardía, se cuantificó que las plantas con amachamiento tuvieron en contenido relativo de clorofila mayor (54 SPAD) que plantas sanas (37 SPAD). A través del reconocimiento de los síntomas del amachamiento del frijol, es posible realizar un diagnóstico acertado de la enfermedad.

Keywords

False angular leaf spot; leaf nematode; *Aphelenchoides besseyi*; *Phaseolus vulgaris*.

Abstract

The “amachamiento” of the common bean is caused by the leaf nematode *Aphelenchoides besseyi* Christie. The disease can be recognized through the symptoms of angular necrotic tissue, foliar deformation, late senescence and pods absence. Initially, the symptoms of angular necrosis were called false angular spot. In addition, incorrectly the leaf deformation was diagnosed as a viral disease. This work establishes and describes the symptoms of “amachamiento”. Based on the literature, field observations and experience of the bean growers, the bean tissue was analyzed to describe the symptoms. In 2014 and 2015, twenty-four Costa Rican farms were visited (San José and Puntarenas provinces); plant material was collected from each farm. Leaf deformation is the predominant symptom, present in 83% of plants; whereas the angular necrosis in 45% of the plants with “amachamiento”. The pods number decline was 46% compared to healthy plants. The late senescence was evident in diseased plants, that plants had higher relative chlorophyll content (54 SPAD). The healthy plants had a low chlorophyll content (37 SPAD). Through the recognition of the symptoms of “amachamiento”, it is possible to have an accurate diagnosis of the disease.

Introducción

El frijol común aporta 15% de las calorías consumidas por la población a nivel mundial [1]. En 2017, en Costa Rica se dedicaron 17900 ha para la siembra del frijol [2]. Las principales zonas de producción son las regiones Brunca, Huetar Norte y Chorotega [3]; el consumo *per capita* de frijol es de 9,1 kg en la zona urbana.

El amachamiento del frijol es una enfermedad provocada por el nematodo foliar *Aphelenchoides besseyi* Christie (Aphelenchoididae: Nematoda) [4]. Esta enfermedad fue reportada por primera vez en 1984 [5], en dicho estudio se describió las lesiones necróticas en las hojas de frijol. Esos

autores lograron aislar al nematodo foliar *Aphelenchoides besseyi* Christie. En dicho reporte, se describieron manchas necróticas en forma angular delimitadas por las nervaduras de las hojas. A dicho síntoma le denominaron falsa mancha angular; esto debido a la similitud con los síntomas de la mancha angular. La mancha angular es causada por el hongo *Phaeosariopsis griseola* [6].

A principio de los años noventa, en Costa Rica apareció una enfermedad en frijol caracterizada por la deformación de la lámina foliar y la ausencia de vainas. Para entonces, la enfermedad fue diagnosticada de origen viral, específicamente del virus del moteado clorótico del caupí (CCMV) [7]. Posteriormente, con base en un muestreo de campo y el análisis mediante la técnica DAS-ELISA, determinaron que el 57% del total de muestras, resultaron negativas para el CCMV y otros virus de frijol, esta cifra fue insuficiente para diagnosticar al virus como el agente causal del amachamiento.

El nematodo *A. besseyi* fue reportado como el agente causal del amachamiento [4]. Además, esos investigadores agruparon la deformación foliar y la necrosis angular como síntomas de esta enfermedad. También se asoció la ausencia de flores y la consecuente disminución en la cantidad de vainas [8], como un daño directo del hábito alimentario de *A. besseyi*. Calderón (2018) encontró que la disminución de vainas provocada por el amachamiento fue del 64% en plantaciones de frijol de la región Brunca. Además, reportó plantas sin vainas.

El amachamiento tiene una distribución en parches [9]. Al final del ciclo de cultivo, estos parches de plantas senescen de manera tardía. Las plantas con amachamiento no producen vainas y esto cambia la relación fuente sumidero. Las hojas no translocan los asimilados y por ello permanecen con un mayor contenido de clorofila [10].

Distintos informes científicos han descrito de manera aislada los síntomas del amachamiento [5], [9], [11] y [15], sin existir un documento que los describa a todos. Aunado a lo anterior, existió durante algún tiempo un diagnóstico errado, lo que genera ambigüedad en la información. Por ello, el objetivo de esta nota es definir y describir cada uno de los síntomas que provoca la infestación del nematodo foliar *A. besseyi* en plantas de frijol común

Materiales y métodos

Se definieron y caracterizaron los cuatro síntomas del amachamiento. La determinación de los síntomas se basó en las observaciones y descripciones realizada por tres investigaciones en amachamiento del frijol [4], [9] y [11], la experiencia de los productores de frijol, y el análisis de los tejidos de plantas de frijol muestreadas en campos afectados. Se visitaron 24 fincas productoras de la región Brunca, específicamente de los poblados de El Águila (9,1240 -83,5304 N, O), Veracruz (9,1240 -83,5304 N, O) y Chánguena (8,8859 -83,2095 N, O). Las fincas fueron visitadas durante los años 2014 y 2015. Se tomaron muestras de tejido foliar, floral y de vainas para corroborar la presencia del nematodo.

Identidad del nematodo

Los nematodos fueron aislados a partir de lesiones típicas del amachamiento. En total se tomaron 24 hojas con síntomas de necrosis y 24 con deformación foliar. En laboratorio, se tomaron dos gramos de tejido foliar y se picaron en trozos de 4 mm². Estos se colocaron en beakers con 10 ml de agua. Luego de dos horas, los nematodos salieron de las hojas y quedaron suspendidos en el agua. La solución fue tamizada con una criba de 100 mesh y otra de 500, así se recuperó a los nematodos y se descartó el tejido foliar. Se tomaron seis nematodos de cada muestra y fueron colocados en un tubo plástico con 12 µl de solución tamponadora DreamTaq. El ARN fue extraído con proteinasa-K y posteriormente, se analizaron mediante la técnica Polymeric

Chain Reaction (PCR); se utilizó la region cromosómica comprendida entre D2A y D3B, la cual permite la identificación de nematodos a nivel de especie. Finalmente, el producto de la PCR se amplificó en gel de agarosa.

Progreso en la aparición de los síntomas

En 2015, se inoculó 63 plantas de frijol variedad Cabécar 21 días después de la siembra. El inóculo consistió de una solución con nematodos identificados como *A. besseyi*. Semanalmente, se registró la aparición de necrosis y deformación foliar. Además, se cuantificó la cantidad de las vainas por plantas. Todo ello, fue contrastado con el tratamiento de plantas no inoculadas. Las evaluaciones se realizaron hasta la cosecha de las plantas.

Las plantas fueron sembradas en macetas bajo un ambiente controlado, específicamente una casa de mallas con un sistema de nebulización que realizó microaspersiones durante 10 minutos por cada hora. El ensayo fue repetido en el tiempo dos veces, con siembras en julio del 2015 y en enero del 2016.

Senectud tardía

La senectud tardía de las plantas de frijol fue reportada como un síntoma del amachamiento. La senectud fue cuantificada a través del contenido relativo de la clorofila de las hojas, para lo cual se utilizó un clorofilómetro Konika-Minolta, modelo 502. Este equipo determina la cantidad de clorofila a través de la transmisión de la luz de dos distintas longitudes de onda emitidas por el equipo. Se evaluó en hojas de plantas sanas y enfermas con la misma edad cronológica. Los tratamientos fueron plantas enfermas con síntomas de necrosis, con deformación foliar y plantas sanas. Por tanto, se evaluaron 30 hojas de plantas sanas, 30 con síntomas de necrosis y 30 con la deformación foliar. Se evaluó la hoja joven completamente expandida a los 60 y 75 días después de la siembra. Los resultados fueron analizados mediante una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de White para conocer la homocedasticidad de los datos. Posterior a ello, se realizó el análisis de la varianza, y luego los datos fueron sometidos a una prueba de separación de Tukey (95% de confiabilidad).

Resultados y discusión

El amachamiento del frijol se caracteriza por presentar cuatro síntomas: necrosis foliar (figura 1a), deformación foliar (figura 1b), la ausencia parcial o total de vainas (figura 1c) y la senectud tardía (figura 1d). A partir de las observaciones de campo y la experiencia de productores, se determinó que no siempre se presentan los síntomas de manera simultánea.



Figura 1. Síntomas del amachamiento en plantas de frijol. Necrosis foliar angular (a), deformación foliar (b), ausencia de vainas (c) y senectud tardía de las plantas (d). Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit, Alajuela Costa Rica. 2015 y Pérez Zeledón, Costa Rica. 2016

Necrosis

Las lesiones necróticas se caracterizan por su forma angular; estas aparecieron en el 45% de las plantas con amachamiento. Las lesiones necróticas generalmente coalescen cerca del peciolo de la hoja [12], debido a que luego de un evento lluvioso o del rocío nocturno, en este sitio de la planta se mantiene una película de agua que es aprovechada por el nematodo para reproducirse, movilizarse e infectar [11]. Estas lesiones no presentan un halo clorótico y raramente la necrosis sobrepasa el 20% del área de la lámina foliar (figura 1a). En especial, este síntoma de necrosis suele confundirse con la enfermedad conocida como mancha angular, la cual es causada por el hongo *P. griseola*. Sin embargo, el hongo produce conidióforos de color gris en el envés de las hojas [13]; esos conidióforos miden 0,7 mm de longitud y es el signo que permite diferenciar entre ambas enfermedades.

Las lesiones necróticas se caracterizan por ser de forma angular, ya que el nematodo ingresa al mesófilo de las plantas; sin embargo, es incapaz de atravesar las venas [14]. Las lesiones necróticas generalmente coalescen cerca del peciolo de la hoja (figura 2), pues es allí donde, luego de un evento lluvioso, se mantiene una película de agua que es aprovechada por el nematodo para movilizarse e infectar [15]



Figura 2. Hojas de frijol común con síntoma de necrosis foliar. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit, Alauela Costa Rica. 2015.

Deformación foliar

Esta alteración foliar se debe a la deformación de las nervaduras central y secundarias de cada hoja (figura 3a) El tejido intervenal no parece estar alterado, sin embargo, las nervaduras parecen acortarse (figura 3b). Este síntoma suele aparecer en etapas de desarrollo posteriores a la antesis. Generalmente, aparecen en etapas de formación y llenado de vainas. Es el síntoma más evidente y frecuente. Dicho síntoma se presentó en el 76% de las plantas con amachamiento.

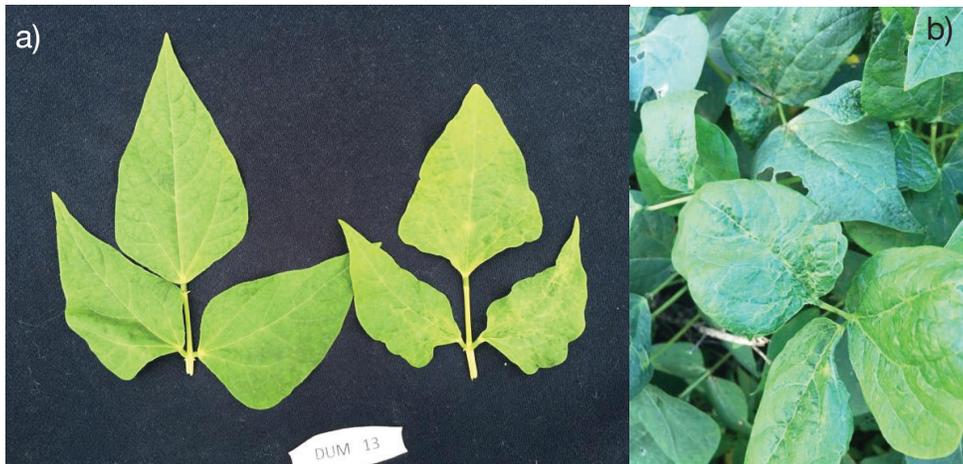


Figura 3. Síntoma de la deformación foliar del amachamiento en plantas de frijol. (a) trifolio sano y con amachamiento, (b) síntomas de deformación foliar. Pérez Zeledón, Costa Rica. 2016.

Ausencia de vainas

La cantidad de vainas por planta es el único componente de rendimiento que se afecta por causa del amachamiento [8], lo que afecta directamente la productividad del frijol. De acuerdo con los resultados encontrados en el ensayo, la cantidad de vainas por cada planta siempre fue menor en plantas infectadas con amachamiento. La variedad Cabécar pasó en promedio de 12,4 vainas en plantas sanas a 7,7 en plantas infectadas, lo que significó una disminución del 43% del número de vainas (figura 4).



Figura 4. Ausencia parcial de vainas en planta de frijol con amachamiento. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit, Alajuela, Costa Rica. 2015.

Senectud tardía

La senescencia tardía de las plantas es otro síntoma del amachamiento [9]. Las plantas con amachamiento producen pocas vainas, por lo que la relación fuente-sumidero varía con respecto a plantas sanas. En plantas con amachamiento, carentes de vainas, los compuestos de nitrógeno y otros elementos esenciales no se translocan desde las hojas hacia las vainas para ser almacenados en los granos, por lo que la planta se mantiene verde y vigorosa y alarga

su ciclo de vida [16]. Normalmente, la senectud comienza cuando las semillas del frijol alcanzan la maduración fisiológica [17]. Para esta etapa de desarrollo, las plantas empiezan a senescer ya que trasladan los compuestos hacia los granos [18].

La senectud de las plantas se debe, en parte, a la degradación y reciclaje de la clorofila. El índice de clorofila de una planta sana de frijol, durante la etapa V7, rondó las 35 unidades Spad (figura 5), mientras que las plantas con deformación foliar se mantuvieron con la coloración verde de sus hojas (54 Spad), puesto que el nitrógeno no es redirigido significativamente hacia ninguna otra parte de la planta [10].

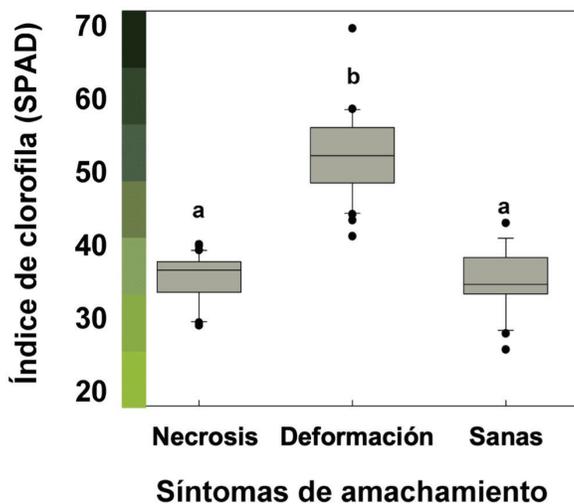


Figura 5. Índice de clorofila, con escala visual de tonos de verde de plantas con necrosis angular, deformación foliar y tejido foliar de plantas sanas (n=30). Pérez Zeledón, Costa Rica. 2016.

En general, las plantas con síntomas de deformación foliar suelen presentar poca cantidad de vainas, es por ello, que se mantienen verdes por más tiempo (52 Spad). Las plantas que únicamente presentaron síntomas de manchas necróticas presentaron menor cantidad relativa de clorofila (37 Spad) (figura 5). Las lesiones necróticas se concentraron en las hojas bajas. Posiblemente algún factor ambiental no le permitió al nematodo continuar hacia estratos superiores de la planta, por tanto, la planta sí produjo vainas y hubo senescencia. En estas plantas el nitrógeno pudo ser translocado hacia las hojas nuevas y hacia la formación y llenado de los granos. Cabe destacar que el nitrógeno es un elemento móvil y la planta lo redirige hacia órganos sumideros [16].

Con base en los resultados obtenidos, la cantidad de vainas por planta siempre fue menor en plantas infectadas por el amachamiento. Entre los síntomas de deformación y de necrosis, la deformación fue el más común; 82% de las plantas con amachamiento presentó deformación foliar, mientras que el 38% presentaron la necrosis foliar. Además, la cantidad de vainas por planta y la senectud tardía mostraron una leve relación inversa ($R^2 = 0,54$; $r = 0,398$), pues a menor cantidad de vainas, mayor fue el contenido de clorofila en las hojas.

La reducción en la productividad debido al amachamiento, alcanza valores de hasta 75% [12] pues las plantas no forman flores ni vainas. Las plantaciones de la región Brunca son la más afectadas; allí las estrategias de manejo de la enfermedad, tales como la preparación del terreno y rotación de cultivos, son difíciles de realizar [19]. Ese mismo autor demostró que el nematodo provoca daño en los primordios florales y foliares, y posteriormente las hojas se deforman y necrosan.

Actualmente, la rotación de cultivos y la labranza han sido las únicas medidas que han logrado disminuir el inóculo [19]. Por ello, el reconocimiento de los síntomas permite no confundir esta enfermedad con otra. Además de brindar la posibilidad de decidir acerca de la rotación o labranza en los terrenos.

El amachamiento del frijol común presenta cuatro síntomas. Estos síntomas son la deformación foliar, la necrosis angular, la ausencia total o parcial de vainas y la senectud tardía de las plantas. El reconocimiento de estos permite a los productores y técnicos realizar un diagnóstico acertado y tomar las medidas necesarias para el próximo ciclo de siembra.

Referencias

- [1] P. B. Geil y J. W. Anderson, "Nutrition and health implications of dry beans: a review", *J. Am. Coll. Nutr.*, vol. 13, n° 6, pp. 549-558, dic. 1994.
- [2] FAOSTAT, "Crop production". 2019.
- [3] Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, "Boletín Estadístico Agropecuario N° 24". 2014.
- [4] N. Chaves, E. Cervantes, I. Zabalgoageazcoa, y C. Araya, "*Aphelenchoides besseyi* Christie (Nematoda: Aphelenchoididae), agente causal del amachamiento del frijol común", *Trop. Plant Pathol.*, vol. 38, n° 3, pp. 243-252, 2013.
- [5] L. Salas y E. Vargas, "El nematodo foliar *Aphelenchoides besseyi* Christie (Nematoda: Aphelenchoididae) como causante de la falsa mancha angular del frijol en Costa Rica", *Agron. Costarric.*, vol. 8, n° 1, pp. 65-68, 1984.
- [6] P. W. Crous, M. M. Liebenberg, U. Braun, y J. Z. Groenewald, "Re-evaluating the taxonomic status of *Phaeoisariopsis griseola*, the causal agent of angular leaf spot of bean", *Stud. Mycol.*, vol. 55, pp. 163-173, may 2006, doi: 10.3114/sim.55.1.163.
- [7] F. Morales *et al.*, "Etiología del amachamiento del frijol común en Costa Rica", *Manejo Integrado Plagas Agroecol.*, vol. 52, n° 1, pp. 42-48, 1999.
- [8] N. Chaves y C. Araya, "Efecto de la rotación de cultivos en la incidencia del amachamiento (*Aphelenchoides besseyi* Christie) en frijol.", *Agron. Costarric.*, vol. 36, n° 2, pp. 61-70, 2012.
- [9] N. Chaves y C. M. Araya, "Distribución espacial del amachamiento del frijol (*Aphelenchoides besseyi* Christie) en campo.", *Agron. Mesoam.*, vol. 25, n° 1, p. 13, abr. 2014, doi: 10.15517/am.v25i1.14186.
- [10] L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, y A. Murphy, Eds., *Plant physiology and development*, Sixth edition. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates, Inc., Publishers, 2015.
- [11] R. Calderón, "Identificación genética y distribución geográfica de *Aphelenchoides* spp., agente causal del amachamiento en frijol y la búsqueda de fuentes de resistencia genética", Maestría académica, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, 2018.
- [12] W. Barrantes y C. Araya, "Reacción de variedades de frijol a la inoculación artificial de *Aphelenchoides besseyi*, agente causal de la falsa mancha angular", *Agron. Mesoam.*, vol. 19, n° 1, pp. 19-26, 2008.
- [13] G. S. Mahuku, C. Jara, J. B. Cuasquer, y G. Castellanos, "Genetic variability within *Phaeoisariopsis griseola* from Central America and its implications for resistance breeding of common bean", *Plant Pathol.*, vol. 51, n° 5, pp. 594-604, oct. 2002, doi: 10.1046/j.1365-3059.2002.00742.x.
- [14] V. Chizhov, O. Chumakova, S. Subbotin, y J. Baldwin, "Morphological and molecular characterization of foliar nematodes of the genus *Aphelenchoides*: *A. fragariae* and *A. ritzemabosi* (Nematoda: Aphelenchoididae) from Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow.", *Russ. J. Nematol.*, vol. 14, n° 2, pp. 179-184, 2006.
- [15] C. Araya y J. C. Hernández, *Guía para la identificación de las enfermedades del frijol más comunes en Costa Rica*. 2006.
- [16] P. Marschner, *Marschner's mineral nutrition of higher plants (Mineral nutrition of higher plants)*. Academic Press, 2012.
- [17] S. Schiltz, "Dynamics of exogenous nitrogen partitioning and nitrogen remobilization from vegetative organs in pea revealed by ¹⁵N in vivo labeling throughout seed filling", *Plant Physiol.*, vol. 137, n° 4, pp. 1463-1473, abr. 2005, doi: 10.1104/pp.104.056713.

- [18] D. R. Cooper, D. G. Hill-Cottingham, y C. P. Lloyd-Jones, "Absorption and re-distribution of nitrogen during growth and development of field bean, *Vicia faba*", *Physiol. Plant.*, vol. 38, nº 4, pp. 313–318, dic. 1976, doi: 10.1111/j.1399-3054.1976.tb04011.x.
- [19] N. Chaves y C. Araya, "Pérdidas causadas por el amachamiento del frijol (*Aphelenchoides besseyi* Christie) y la reacción del germoplasma comercial al patógeno", *Agron. Mesoam.*, vol. 23, nº 1, pp. 1–12, 2012.

Consideraciones geográficas para vuelos con Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia en Costa Rica

Geographic considerations for flights with Remotely Piloted Aircraft Systems in Costa Rica

Ramón Masís-Campos¹, Jonnathan Reyes-Chaves²,
Melvin Lizano-Araya³

Fecha de recepción: 2 de mayo de 2021
Fecha de aprobación: 23 de setiembre de 2021

Masís-Campos, R; Reyes-Chaves, J; Lizano-Araya, M. Consideraciones geográficas para vuelos con sistemas de aeronaves pilotadas a distancia en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 167-177.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5640>

- 1 Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ramon.masiscampos@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5808-3265>
- 2 Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jonnathan.reyeschaves@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5381-8330>
- 3 Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: melvin.lizanoaraya@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3437-3502>

Palabras clave

Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia; áreas prohibidas; áreas restringidas; condiciones climáticas; recursos aeronáuticos; Costa Rica.

Resumen

La finalidad del siguiente trabajo fue estudiar y analizar las regulaciones territoriales que existen actualmente en Costa Rica y que limitan a los pilotos de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, del inglés Remotely Piloted Aircraft System) volar en el espacio aéreo controlado (aeropuertos, aeródromos, helipuertos), así como espacios prohibidos (La Reforma, Volcán Arenal), espacios restringidos (Murciélagos, Paso La Palma, Casa Presidencial, Ministerio de Seguridad) o en las zonas urbanas del país. De esta manera, se estudió los factores que condicionan el rendimiento de la aeronave y la seguridad de vuelo como son: las condiciones climáticas de Costa Rica, especialmente los elementos como: vientos, lluvias, temperaturas, eventos extremos y la visibilidad. Además de las interferencias magnéticas para la navegación producto de las tormentas solares (y su efecto sobre la ionosfera terrestre), entre otras perturbaciones locales. Igualmente, este trabajo señaló los factores correspondientes con obstáculos visuales en el terreno (estructuras, árboles, fauna, entre otros). Finalmente se mostró los recursos disponibles para que los pilotos RPAS puedan tomar las mejores decisiones en sus operaciones a partir del pronóstico del tiempo y la cartografía aeronáutica para la navegación, además de recursos complementarios como aplicaciones para dispositivos móviles.

Keywords

Remotely piloted aircraft system; prohibited areas; restricted areas; weather conditions; aeronautical resources; Costa Rica.

Abstract

The purpose of the following work was to study and analyze the territorial regulations that currently exist in Costa Rica and that limit pilots of Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) to fly in controlled airspace (airports, aerodromes, heliports), as well as prohibited spaces (La Reforma, Arenal Volcano), restricted spaces (Murciélagos, Paso La Palma, Presidential House, Ministry of Security) or in urban areas of the country.

In the same way, the factors that determine the performance of the aircraft and flight safety were studied, such as: the climatic conditions of Costa Rica, especially the elements: winds, rains, temperatures, extreme events and visibility. In addition to the magnetic interference for navigation products of solar storms, among other local disturbances. Likewise, this work pointed out the corresponding factors with visual obstacles on the ground (buildings, trees, fauna, among others). Finally, the resources available to RPAS pilots to make better decisions in their operations based on weather forecasting and aeronautical cartography for navigation were shown, as well as complementary resources such as applications for mobile devices.

Introducción

El uso de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, del inglés Remotely Piloted Aircraft System) ha sido introducido en la sociedad desde hace pocos años para diversas aplicaciones civiles (urbanismo, agricultura, minería, arqueología, fotografía profesional, cine, monitoreo de paisajes, seguimiento de amenazas naturales, mercadeo entre otras). En los

estudios geográficos se ha demostrado que son herramientas versátiles, precisas y ofrecen la capacidad de analizar el territorio en diferentes escalas (espaciales, temporales, espectrales) por medio de la obtención de productos como: ortomosaicos, modelos de superficie, de terreno, índices de vegetación, videos, fotografías oblicuas, panorámicas, entre otros.

La alta disponibilidad de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia en el mercado en la última década ha generado que muchas personas u organizaciones adquieran esta tecnología por asuntos recreativos, profesionales o corporativos. Esta circunstancia ha generado preocupación en la industria aeronáutica por el alto tráfico de RPAS en áreas destinadas para la operación de aeropuertos, centros penales, bases militares, espacios gubernamentales o de seguridad nacional.

A nivel mundial existe la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) que es una agencia de la Organización de las Naciones Unidas responsable de establecer por convenios las reglas en la aeronáutica mundial [1]. Desde 2005 la OACI ha emitido directrices a los diferentes estados para regular por medio de legislación nacional y la estandarización de la operación de RPAS por medio de la emisión de documentación técnica de acatamiento obligatorio [2].

A partir de 2017, la Dirección General de Aviación Civil (DGAC) de Costa Rica ha publicado una directiva operacional para este fin y establece el marco técnico-jurídico que regula las condiciones de explotación de estas aeronaves para la realización de los diferentes trabajos aéreos con RPAS [3].

El presente trabajo es una investigación de tipo analítica descriptiva, enfocada en identificar, describir y analizar las regulaciones territoriales que existen actualmente en Costa Rica que limitan a los pilotos de RPAS a volar en el espacio aéreo controlado, espacios prohibidos y espacios restringidos. De esta manera se estudió los factores asociados al clima, tormentas solares, obstáculos visuales en el terreno y recursos para la operación (pronóstico del tiempo y la cartografía aeronáutica) que condicionan la seguridad de los vuelos. Consecuentemente se realizó una selectiva revisión bibliográfica temática para abordar el presente trabajo.

Resultados

Consideraciones territoriales

En el país existen un conjunto de espacios prohibidos y restringidos para operar los RPAS. La Dirección General de Aviación Civil ha emitido las regulaciones territoriales en los documentos: Directiva Operacional DO-001-OPS-RPAS y AIP Costa Rica [3], [4].

En la normativa se establecen zonas prohibidas, restringidas y zonas con espacio aéreo controlado para evitar peligros que afecten la seguridad o el orden público, especialmente la seguridad del tránsito aéreo. En detalle, zonas prohibidas (La Reforma, Volcán Arenal) espacios aéreos controlados (aeropuertos, aeródromos), espacios restringidos (Murciélagos, Paso La Palma, Casa Presidencial, Ministerio de Seguridad) y sobre las zonas urbanas del país. La ubicación de estos lugares se puede observar en la figura 1.

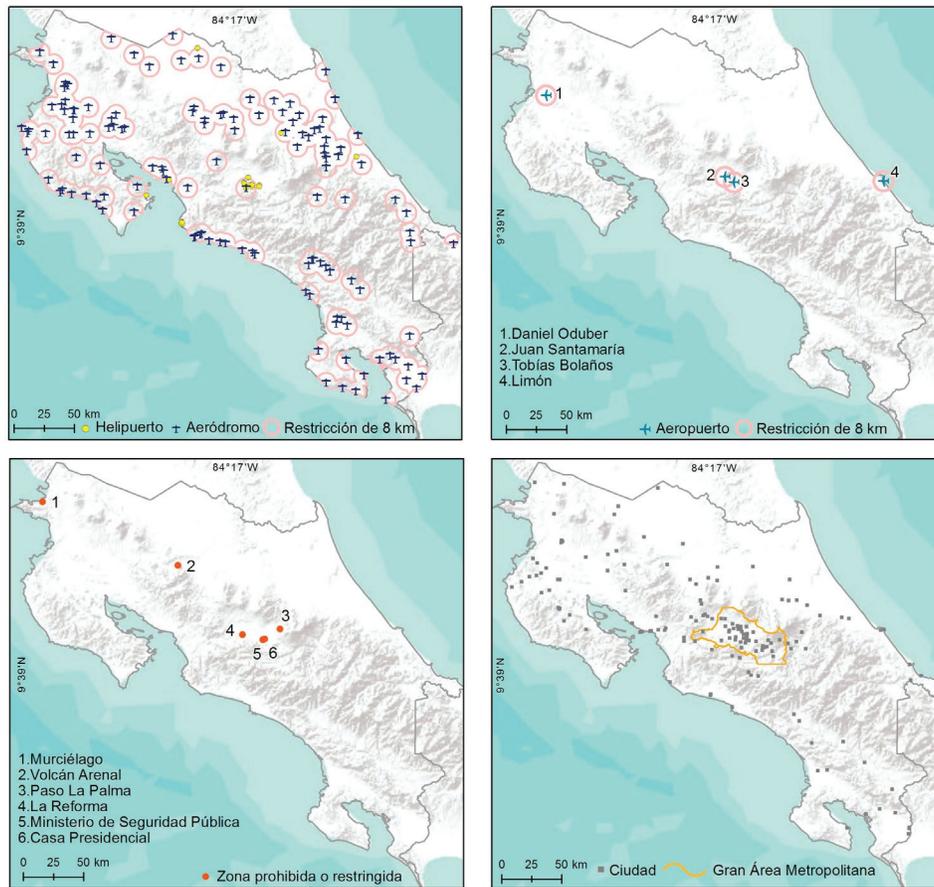


Figura 1. Distribución de aeródromos, helipuertos, aeropuertos, anillo de restricción de 8 km, zonas prohibidas, restringidas y ciudades de Costa Rica

Respecto los espacios aéreos controlados hay que considerar que Costa Rica cuenta con 132 aeródromos distribuidos en 91 de 487 distritos del país, además existe un anillo de restricción de 8 km por cada aeródromo (esta área es equivalente a 200,96 km²). A nivel provincial, Guanacaste cuenta con la cuarta parte de los aeródromos nacionales. Y junto con Puntarenas y Limón concentran más del 60% de estos espacios.

Respecto a los aeropuertos internacionales, dos están dentro del Gran Área Metropolitana y dos fuera de la capital (cuadro 1), además aplica el anillo de 8 km. No obstante, puede solicitarse los permisos y la aprobación de los procedimientos por la Dirección de Aviación Civil mediante la emisión de un *NOTAM* (acrónimo del inglés *Notice To Airmen*) [3].

Cuadro 1. Aeropuertos internacionales de Costa Rica.

Aeropuerto	IATA	Ubicación
Aeropuerto Internacional Juan Santamaría	SJO	Alajuela
Aeropuertos Internacional Tobías Bolaños	SYQ	San José
Aeropuertos Internacional Daniel Oduber	LIR	Guanacaste
Aeropuerto Internacional de Limón	LIO	Limón

Adicionalmente, el país cuenta con 12 helipuertos autorizados, la mayoría privados distribuidos en San José (5), Puntarenas (3), Heredia (2), Limón (1), Alajuela (1). Es decir, en las provincias de Cartago y Guanacaste no hay helipuertos.

Una zona prohibida para volar RPAS es el volcán Arenal, estrato volcán con actividad piroclástica y estromboliana de 1670 msnm, ubicado en distrito La Fortuna, cantón San Carlos, provincia Alajuela. Donde se establece una prohibición de un radio de 1 milla náutica, es decir 11 km².

Por temas de seguridad existe la prohibición de volar RPAS sobre el centro penal “La Reforma” que igualmente se encuentra en el anillo de restricción de 8 km del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. La Reforma es un complejo de centros de atención institucional (Jorge Arturo Montero Castro, Luis Paulino Mora Mora, Adulto Mayor, Ofelia Vincenzi Peñaranda, Gerardo Rodríguez Echeverría, Ofelia Vincenzi Peñaranda y Reinaldo Villalobos Zúñiga) de aproximadamente 27 ha ubicado en San Rafael de Alajuela. No obstante, en Costa Rica existen 14 centros penales en el territorio nacional que deberían estar regulados para este fin, como se muestra en el cuadro 2

Cuadro 2. Centros penales de Costa Rica.

Centro Penal	Ubicación provincial
Centro de Atención Institucional San José	San José
C.A.I. Antonio Bastida de Paz	Puntarenas
C.A.I. Jorge Arturo Montero Castro	Alajuela
C.A.I. Luis Paulino Mora Mora	Alajuela
Centro de Atención Institucional Adulto Mayor	Alajuela
C.A.I. Gerardo Rodríguez Echeverría	Alajuela
Centro de Atención Institucional Nelson Mandela	Alajuela
Centro de Atención Institucional Jorge Debravo	Cartago
Centro de Atención Institucional Puntarenas	Puntarenas
Centro de Atención Institucional Liberia	Guanacaste
Centro de Atención Institucional Marcus Garvey	Limón
C.A.I. Carlos Luis Fallas	Limón
C.A.S.I. San Ramón – Finca la Paz	Alajuela
C.A.S.I. San Ramón	Alajuela
C.A.S.I. San Agustín	Heredia
Centro de Formación Juvenil Zurquí	Heredia
Centro Especializado Ofelia Vincenzi Peñaranda	Alajuela
C.A.I. Vilma Curling Rivera	San José
U.A.I. Reinaldo Villalobos Zúñiga	Alajuela
U.A.I. Pablo Presberí	Puntarenas

Fuente: Ministerio de Justicia y Paz

Por otro lado, las zonas restringidas establecen regulaciones en Murciélagos, Paso La Palma, Casa Presidencial y el Ministerio de Seguridad. En el caso del Centro de Formación Policial Murciélagos (Guanacaste) se establece una restricción en un radio de 3 millas náuticas. En el

caso del Paso de La Palma, es una depresión intervolcánica entre los volcanes Barva e Irazú en la Cordillera Volcánica Central por donde ingresan los vientos alisios y humedad del Mar Caribe y es un corredor para rutas aéreas de comunicación.

También en la capital, existen restricciones para sobrevolar la Casa Presidencial y el Ministerio de Seguridad Pública. Adicionalmente se deben extremar las medidas de seguridad para volar RPAS en espacios donde típicamente se desarrollan otras actividades de carácter recreativo; como el parapente (La Pastora de Turrialba, Jacó, Caldera, Barranca, Dominical), aeromodelismo (Tambor y la Guácima de Alajuela), zona de operación de globos tripulados (en un radio de 7 millas náuticas de San Jerónimo de Naranjo), zonas de entrenamiento de aviación, fumigación a plantaciones bananeras con avionetas a muy baja altitud en la provincia de Limón, entre otras.

Finalmente, es importante señalar que las aeronaves no pueden sobrevolar sobre aglomeraciones de personas y sobre las estructuras en ciudades. Es decir, que corresponde mínimo con la ubicación de las 82 cabeceras de municipalidad y 488 centros distritales de Costa Rica, según la división política administrativa en el año 2021 [5]. No obstante, cuando se obtiene el permiso de la DGAC para realizar una operación especial se restringen los vuelos a no más de 30 metros de edificios o de reuniones de personas al aire libre.

Consideraciones en campo

Factores climáticos

Dentro de los factores en campo que influyen significativamente en la ejecución de misiones con RPAS están las condiciones climáticas del área de estudio, ya que limitan el rendimiento de la aeronave y la seguridad de vuelo. Especialmente variables como: vientos, precipitación, turbulencia, masas de aire, nubosidad, tormentas y cambios de temperatura. Estas variables pueden cambiar según la escala de análisis.

En el caso de Costa Rica, los pilotos de RPAS tienen que considerar que el país por su ubicación geográfica entre los paralelos 8°30' y 11°0' latitud norte tiene un clima tropical modificado por factores como: orografía, su condición ístmica en la región centroamericana, la influencia oceánica (vientos, brisas marinas, humedad) y la circulación general de la atmósfera, además de la interacción de factores locales [6].

La orientación noroeste-sureste eje montañoso central divide al territorio costarricense en la vertiente Pacífica y Caribe. El país al entrar en contacto con los vientos alisios del noreste cargados de humedad del mar Caribe, precipitan abundantemente en toda la fachada noreste del país y penetran por pasos o collados hasta el Valle Central y algunos sectores deprimidos de la vertiente Pacífico (figura 2). Consecuentemente cada vertiente presenta su propio régimen de lluvias y temperaturas con características particulares de distribución espacial y temporal [6].

A lo largo del año, Costa Rica es perturbada por eventos extremos de escala sinóptica. En el caso de la estación lluviosa, la temporada de ciclones en el Caribe inicia el 1 de junio y se extiende hasta el 30 de noviembre de cada año [7], provocando impactos indirectos y directos por vientos y precipitaciones en el territorio nacional por el tránsito de huracanes, tormentas, depresiones y ondas tropicales. En contraste, durante la estación seca es constante el arribo al país de los sistemas de bajas presiones y los frentes fríos de las zonas polares de Norteamérica, entre los meses noviembre y febrero.

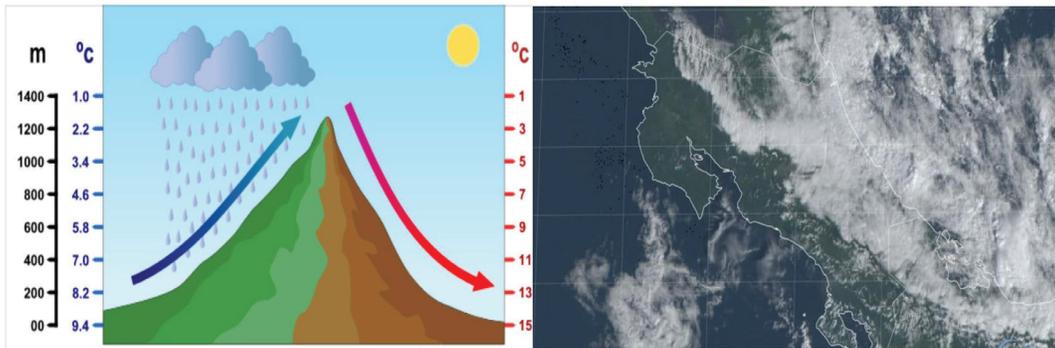


Figura 2. Efecto orográfico en la distribución de lluvias en el país. IMN, 2020.

Cambiando a las escalas de mesoescala y microescala, los pilotos de RPAS deben considerar el desarrollo de otros fenómenos meteorológicos en la región. Tal es el caso de las brisas marinas que son inducidas por diferencias horizontales de temperatura (calentamiento y el enfriamiento) entre la superficie marina y la tierra. Este fenómeno es más evidente en la costa, pero puede penetrar varios kilómetros en el territorio nacional. De la misma manera existen brisas de valle-montaña que se desarrollan por el contraste de la insolación del suelo provocado por el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno entre los sistemas montañosos (especialmente en sus laderas) y los fondos de los valles [8].

Otro factor determinante a esta escala en la operación segura de RPAS es la visibilidad, que puede ser alterada por la presencia de niebla o neblina en el lugar. También la visibilidad puede estar condicionada por la hora del día. Por su latitud, el territorio nacional no tiene grandes contrastes entre la duración del día y de la noche a lo largo del año, excepto en sus respectivos solsticios y equinoccios. Vale la pena mencionar que según la legislación que regula la operación de RPAS, los vuelos nocturnos están prohibidos, pero están condicionados por la aprobación de un permiso que se debe solicitar ante la Dirección General de Aviación Civil [8]

En resumen, la operación de vuelos seguro con RPAS en Costa Rica está condicionado por un importante análisis de una diversidad de fenómenos meteorológicos que se resume en el cuadro 3.

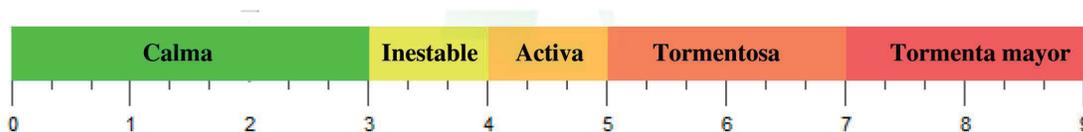
Cuadro 3. Escala de los fenómenos meteorológicos en Costa Rica.

Escala	Fenómenos meteorológicos	Cobertura espacial	Escala Temporal
Macroescala	Alisios, vientos del Oeste, ENOS, Zona de Convergencia Intertropical, La Niña.	Miles de kilómetros	Semanas a meses
Sinóptica	Ondas del este, ciclones, frentes fríos, huracanes.	Cientos miles de Km	Días a semanas
Mesoescala	Brisas de mar-tierra, Brisas de valle-montaña, tormentas, pseudo-tornados.	Uno a cientos de Km	1 hora a 2 días
Microescala	Turbulencia, remolinos, ráfagas de polvo, trombas marinas.	Centímetros a metros	Minutos

Fuente: IMN [6]

Factores magnéticos

La actividad solar genera tormentas que impactan el campo magnético Terrestre. Este fenómeno puede durar horas o días. La NOAA [9] ha definido una escala para cuantificar la intensidad y los efectos a nivel local. En la aeronáutica pueden derivar riesgos en el uso de las telecomunicaciones por la interferencia que puede causar este tipo de ondas. En el caso de los RPAS, las tormentas solares pueden alterar los sistemas globales de navegación satelital (GPS, GLONASS, GALILEO, otros) en inglés (GNSS), la brújula, la telemetría, entre otros sensores a bordo). La escala del índice Kp se muestra explicada en la figura 3.



El índice Kp mide la alteración geomagnética causada por la actividad solar en la Tierra, en una escala de 0 (calma) a 9 (tormenta mayor).

Kp 0 - 4: Totalmente seguro

Kp 4 - 6: Puede experimentar problemas menores con el GNSS

Kp 6 - 7: Puede causar lecturas de ubicación inexactas por GNSS, posible interferencia de radio / control

Kp > 7: Totalmente inseguro. Tiene múltiples bloqueos de satélite. Mayor probabilidad de lecturas de ubicación inexactas, impacto severo del rango de radio/control

Figura 3. Índice Kp para tormentas geomagnéticas.

Otra interferencia magnética local es la presencia del mineral magnetita en las arenas de algunas playas costarricenses que pueden alterar las operaciones con RPAS. Monge [10] señala la distribución de este mineral en playas de Guanacaste (Junquillal, Callejones, Potrero, Brasilito, Prieta, Carbón, Ocotol, y Tamarindo), Puntarenas (Caldera, Tivives, El Roble, Playa Hermosa y Playa Azul) y Limón (Puerto Viejo y Cahuita). Adicionalmente pueden existir interferencias tecnológicas a nivel territorial. Costa Rica posee 6132 km de líneas de transmisión y 65 subestaciones eléctricas [11] que pueden alterar significativamente la navegación de RPAS a baja altitud cerca de estos espacios. La distribución y ubicación de estos lugares en el país están en la figura 4.

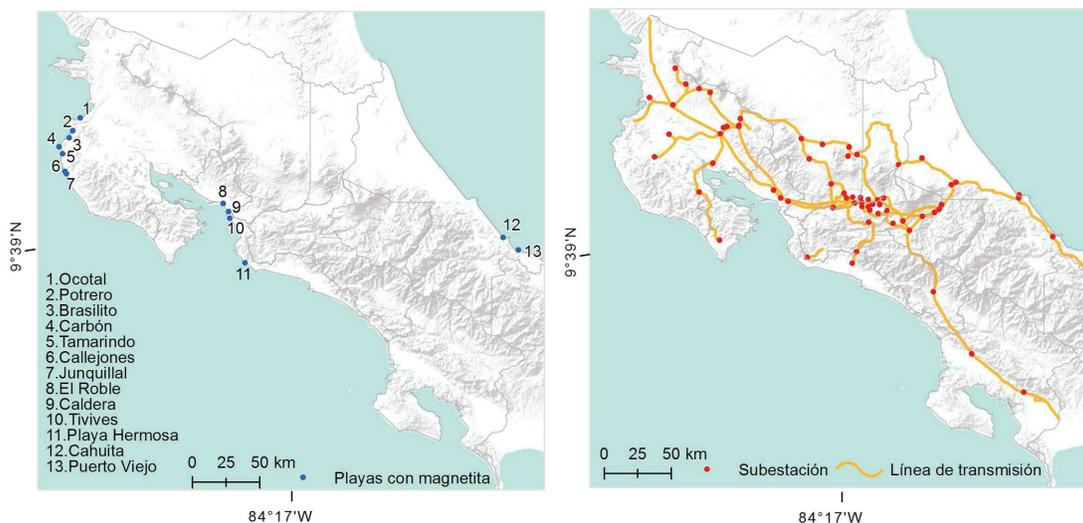


Figura 4. Playas con arena de magnetita y distribución de la línea de transmisión eléctrica en Costa Rica.

Factores visuales del área de estudio

Estos factores corresponden con obstáculos en el terreno cuando se desarrollan operaciones con RPAS dentro de la línea visual del piloto a una distancia que no superan los 500 metros y una sustentación de la aeronave por debajo de los 120 metros de altura o 400 pies. Dentro de los obstáculos visuales a esta escala que pueden provocar incidentes o accidentes se encuentran: estructuras urbanas, automóviles, diferentes estratos de la vegetación, alumbrado eléctrico, líneas de alta tensión, colinas, bandada de aves, aglomeraciones de personas, inclusive volar cerca de otras aeronaves.

Recursos para la medición meteorológica y la navegación aeronáutica

Medición y pronóstico del tiempo

A nivel internacional y local existen servicios y herramientas que utiliza la aviación para tomar decisiones y realizar vuelos seguros. Estos recursos de la aeronáutica para la medición y el pronóstico del tiempo son igualmente empleados por los pilotos RPAS.

En Costa Rica, existen cuatro estaciones meteorológicas aeronáuticas para los aeropuertos: Daniel Oduber (Liberia), Juan Santamaría (Alajuela), Limón y Tobías Bolaños (Pavas). El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) brinda el servicio de observación y pronóstico en aeropuertos, mediante la emisión de reportes como: *Meteorological Aerodrome Reports* (METAR) que se actualizan cada hora, así como el *Terminal Aerodrome Forecast* (TAF) un pronóstico con una vigencia de 24 horas o el informe de meteorología aeronáutica [12].

El IMN posee una robusta red de estaciones meteorológicas instaladas en diferentes regiones y cuencas hidrográficas en el país que miden continuamente los elementos del clima. Este servicio puede ser consultado de manera gratuita y en tiempo real desde la página web del instituto www.imn.ac.cr.

Igualmente, hoy en día han proliferado muchas aplicaciones para dispositivos móviles (celulares o tabletas) que pueden ofrecer el pronóstico local para variables como previsión del tiempo, disponibilidad de satélites *GNSS*, actividad solar (escala Kp), entre otras restricciones de vuelo. Por lo tanto, los pilotos pueden tener instaladas aplicaciones telefónicas como: *UAV Forecast*, *Windy*, *drone Buddy*, *the Weather & Airmap*, entre otros.

Navegación y cartografía

Existen convenciones en la aeronáutica para el uso de cartografía y que pueda ser de consulta para los pilotos de aeronaves. Cada Estado tiene la obligación de proporcionar información del territorio nacional a través de las cartas aeronáuticas.

En el país está oficializado el uso de la carta aeronáutica de la República de Costa Rica, escala 1: 500.000 emitida por el Instituto Geográfico Nacional y la Dirección General de Aviación Civil.

Este producto cartográfico contiene información para la navegación aeronáutica segura como: las elevaciones de la geografía costarricense, la ubicación de aeródromos, ayudas visuales, obstrucciones verticales, instalaciones de radio y navegación, espacios aéreos para uso especial, conos de aproximación hacia los aeropuertos entre otros elementos [13]. Igualmente, en la actualidad existen recursos complementarios como mapas para la navegación que pueden ser consultados por medio de diversas aplicaciones como: *SkyVector*, *DJI's GEO Zone Map*, entre otras.

Conclusiones

A pesar de que la regulación costarricense prohíbe vuelos RPAS sobre la prisión “La Reforma”, existen 18 centros penales más distribuidos en el país que requieren cumplir con las condiciones de seguridad indicadas en este trabajo. Así como existe una prohibición de vuelo sobre el volcán Arenal por diversos factores entre ellos el climático, hay más volcanes activos (Irazú, Turrialba, Poás, Rincón de la Vieja) y sistemas montañosos que ofrecen condiciones extremas asociado a este tema, como: viento, visibilidad, humedad, entre otros. Similarmente ocurre en el Paso de la Palma, ya que existen otros pasos intervolcánicos (Tapezco, Depresión del Desengaño, Coliblanco, otros) y collados en la geografía nacional con condiciones climáticas potencialmente riesgosas o peligrosas para la maniobrabilidad con RPAS y desarrollar con ello un vuelo seguro.

En el caso de las zonas urbanas existe una fuerte limitación para volar en aproximadamente 2000 km² de la Gran Área Metropolitana, además de las ciudades intermedias y pequeñas fuera de la capital. Todas las regulaciones tienen sus excepciones, mientras se cuente con la autorización de la DGAC, además del cumplimiento de la respectiva directriz operacional.

La evaluación de las condiciones del estado del tiempo por parte de los pilotos RPAS es un requisito indispensable para poder realizar vuelos seguros en el país. Especialmente el estudio de los vientos y precipitación, no obstante, existen otras variables geográficas que regulan la operación aeronáutica. Tal es el caso de la dispersión de cenizas producto de la actividad volcánica del país. Por ejemplo, desde octubre de 2014 el volcán Turrialba tiene erupciones de cenizas a gran altitud, que por medio de los vientos distribuyen este material fino dentro y fuera del Valle Central.

Finalmente, otro factor determinante para garantizar los vuelos seguros con RPAS es el conocimiento que debe tener el piloto respecto al equipo que opera y el mantenimiento de la aeronave. En este punto el piloto debe conocer con propiedad los elementos como: la resistencia máxima del viento que tiene la aeronave, la duración de las baterías, la máxima distancia de transmisión de la telemetría, duración de las baterías entre otras variables.

Agradecimientos

Los investigadores desean manifestar su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación de la UCR, en el marco de la actividad de investigación B9762. Igualmente, extendemos gratitud al estudiante Andrés Cornejo Romero por su asistencia técnica en Geografía en 2019.

Referencias

- [1] Federal Aviation Administration. Pilot's handbook of aeronautical knowledge. 2016 [Online]. Available: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/pilot_handbook.pdf
- [2] Organización de Aviación Civil Internacional. Circular 328, Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). 2011. [Online]. https://www.icao.int/Meetings/UAS/Documents/Circular%20328_es.pdf
- [3] Dirección General de Aviación Civil. Directiva Operacional DO-001-OPS-RPAS Operaciones con Sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS). 2020. [Online]. <https://www.dgac.go.cr/wp-content/uploads/2020/12/Modificacion-DO-001-OPS-RPAS-26-de-nov-2020-PRA.pdf>
- [4] Dirección General de Aviación Civil. AIP Costa Rica. GEN 0.1-1 16 jul 2020. [Online]. https://www.dgac.go.cr/wp-content/uploads/2020/11/PARTE-1-GENERALIDADES-AIRAC-AMDT-26_20-RAMOS.pdf
- [5] Sistema Nacional de Información Territorial. División política administrativa, IGN_5:limitedistrital_5k. 2021. [Online]. http://geos.snitcr.go.cr/be/IGN_5/wfs?
- [6] Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones; Instituto Meteorológico Nacional. Sobre algunos fenómenos meteorológicos en Costa Rica. [Online] <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Compendio+sobre+fen%C3%B3menos+meteorol%C3%B3gicos>

- [7] J. P. Valverde Mora. "Variables meteorológicas aeronáuticas en los cuatro aeropuertos internacionales de Costa Rica durante la influencia del ciclón tropical Nate" J. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, vol. 19, pp. 49-69, Dec. 2020
- [8] Federal Aviation Administration . Remote Pilot – Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS) Study Guide. 2016 [Online]. https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/remote_pilot_study_guide.pdf
- [9] National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA Space Weather Scales. Geomagnetic Storms. 2011. [Online] <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>
- [10] R. Monge Valverde. "Contribución al estudio de las arenas negras magnéticas de Costa Rica". Tesis de licenciatura en química. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias y Letras. Departamento de Química, 1965.
- [11] Instituto Costarricense de Electricidad. Líneas de transmisión y campos electromagnéticos. Centro de Servicio Gestión Ambiental de la UEN Proyectos y Servicios Asociados. 2011. [Online] <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/19ae6b97-af0b-4505-aeb5-2e93266182d7/folleto-lineas-de-transmision-y-campos-electromagneticos.pdf?mod=ajperes&cvid=l2l1tgz>
- [12] Instituto Meteorológico Nacional. Informes de meteorología aeronáutica. 2021. [Online]. <https://www.imn.ac.cr/informacion-meteorologica-aeronautica>
- [13] Instituto Geográfico Nacional; Dirección General de Aviación Civil. Carta aeronáutica de la República de Costa Rica, escala 1: 500.000. San José, Costa Rica. CARCR. Edición 4. 1991.

Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo

Main wind tunnels in wind energy research around the world

Gustavo Richmond-Navarro¹, Emanuel Fallas-Hernández²,
José Alejandro Padilla-Barrientos³, Maximino Jiménez-Ceciliano⁴

Fecha de recepción: 13 de junio de 2021
Fecha de aprobación: 6 de octubre de 2021

Fallas-Hernández, E; Padilla-Barrientos, J.A; Richmond-Navarro, G; Jiménez-Ceciliano, M. Principales túneles de viento en la investigación sobre energía eólica alrededor del mundo⁵. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág. 178-194.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5711>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: g-richmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: efallashdez@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2159-0375>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: japadilla99@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5423-6807>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maxjimenez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7222-9961>
- 5 Los autores aquí firmantes están de acuerdo con la versión final de este documento y hacen constar que la conceptualización, preparación y corrección del artículo se realizó según la siguiente distribución: GRN 60%; EFH 20%; JAPB 10%; MJC 10%

Palabras clave

Túnel de viento; energía eólica; turbina de eje horizontal; turbina de eje vertical; estela; perfil aerodinámico.

Resumen

Se presenta una revisión de literatura de los túneles de viento con mayor relevancia en la investigación sobre energía eólica. Se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos de Web of Science (WoS) en la que se obtuvieron 93 artículos que fueron filtrados para el periodo 2016-2020 y mediante distintos criterios de relevancia. Los artículos permitieron identificar 34 túneles alrededor del mundo. Se seleccionaron los ocho túneles de viento con mayor volumen de publicación y se presentan los estudios realizados en estos. Los principales temas encontrados en la revisión tratan sobre turbinas de eje horizontal y vertical, estelas, perfiles aerodinámicos y recurso eólico. Esta revisión tiene como objetivo servir de referencia para los investigadores en energía eólica que requieren realizar experimentos en túneles de viento.

Keywords

Wind tunnel; wind energy; horizontal-axis wind turbine (HAWT); vertical-axis wind turbine (VAWT); wake; airfoil.

Abstract

A literature review about the most relevant wind tunnels in wind energy research is presented. A systematic search was carried in the Web of Science (WoS) database in which 93 papers were filtered by year from 2016 to 2020 and different relevance criteria. From the papers, 34 different wind tunnels were identified around the world. The eight tunnels with the most publications were selected and the research carried in them is presented. The main topics found are research in horizontal wind turbines (HAWT), vertical wind turbines (VAWT), turbine wake, airfoils and wind resource. This review has the objective to serve as a reference guide to researchers in wind energy that require to do experimentation in a wind tunnel.

Introducción

Los túneles de viento son herramientas de investigación para el estudio del paso de aire a través de objetos, estos aparatos cobran mucha relevancia dentro de la investigación de la mecánica de fluidos [1]. Los túneles de viento se desempeñan en múltiples áreas de la ingeniería como el diseño de aeronaves, automóviles, edificios, puentes, intercambiadores de calor entre muchas otras [2,3].

Una de las aplicaciones en las que se utilizan los túneles de viento es en la investigación sobre energía eólica. Este estudio ha incrementado su relevancia gracias al aumento de la producción total de energía eólica alrededor del mundo, la cual es una de las alternativas para los gobiernos que buscan diversificar su producción de energía y reducir su emisión de CO₂ [4]. La investigación en energía eólica permite mejorar la tecnología existente de turbinas, aumentando su eficiencia y minimizando problemas existentes como la contaminación sónica [5]. Los experimentos en túneles de viento permiten determinar de forma experimental, entre otras cosas, las características aerodinámicas de las turbinas eólicas de forma efectiva, rápida y menos costosa respecto a la experimentación en escala completa [6].

Un túnel de viento está conformado por tres partes principales: la sección de pruebas, la sección de contracción y la sección de difusión [1]. De acuerdo con la configuración del túnel estas secciones pueden formar un circuito cerrado o abierto. Los túneles de viento se pueden clasificar de acuerdo con su velocidad de operación (subsónica, transónica o supersónica), tipo de flujo (uniforme o con capa límite) y por el tipo de sección de pruebas (abierta o cerrada).

El diseño de túneles de viento y experimentos dentro de los túneles ha sido un tema ampliamente tratado, para el cual existe documentación clásica como [7] y [8]. Es común que en universidades se realice el desarrollo de túneles de viento a medida de las necesidades de cada laboratorio y del presupuesto disponible [1,2,3,9].

La existencia de una gran variedad de túneles de viento en diversas instituciones de investigación genera una gran oportunidad para los investigadores en energía eólica a realizar colaboraciones con universidades y laboratorios que ya cuentan con el equipo que es requerido. Sin embargo, no existe una revisión donde se identifiquen los distintos túneles de viento que se utilizan en la investigación de energía eólica, sus características y las líneas de investigación que se desarrollan en estos. Por esta razón, el objetivo de este artículo es resumir los principales túneles de viento que se utilizan para realizar investigación en energía eólica orientada a turbinas eólicas. De esta forma las personas investigadoras contarán con una referencia para encontrar túneles que les permitan avanzar con su trabajo.

Metodología

Revisión sistemática

Para realizar la revisión de literatura se utilizó la herramienta de Web of Science (WoS). En el sitio se realizó una búsqueda usando los términos “WIND TUNNEL” AND (“WIND TURBINE” OR “WIND ENERGY”) en documentos de tipo artículo de revista, publicados en el periodo 2016-2020, en la base de datos *Science Citation Index Expanded*. A partir de esta búsqueda se obtuvieron 492 artículos.

La búsqueda fue refinada mediante un filtro de acuerdo con la categoría de WoS, donde se seleccionaron los artículos correspondientes a las categorías “*Energy Fuels*”, “*Mechanics*”, “*Green Sustainable Science Technology*”, “*Thermodynamics*”, “*Engineering Mechanical*”, “*Engineering Multidisciplinary*” e “*Instruments Instrumentation*”. Este filtro redujo los resultados a 419 artículos.

Posteriormente, se buscó tomar las publicaciones de las revistas que divulgan mayor cantidad de artículos en el tema de energía eólica. De esta forma se seleccionaron los artículos correspondientes a las revistas que contribuyeran con cinco o más resultados a la búsqueda. Este filtro redujo los resultados a 317 artículos.

Finalmente, con el objetivo de enfocar los artículos hacia los túneles de viento más importantes en la investigación, se realizó un filtro de acuerdo con la organización afiliada al artículo. De esta forma, se seleccionaron los artículos que corresponden a organizaciones que contribuyeron con cinco o más resultados a la búsqueda. Un total de 149 artículos resultaron de este filtro y estos constituyeron el material que fue procesado para identificar los túneles de viento.

Procesado de resultados

A partir del insumo de los 149 artículos encontrados se comenzó una revisión sobre el texto completo para identificar la temática principal de cada artículo y el túnel de viento utilizado para obtener resultados experimentales. Este procesado llevó a descartar 23 artículos donde no se obtenían resultados experimentales en un túnel de viento, 10 artículos que no trataban la temática de energía eólica enfocada en turbinas y 23 artículos para los cuales la institución donde se realiza esta investigación no tiene acceso. Este procesado permitió identificar 93 artículos que cumplen todos los criterios establecidos.

En los artículos estudiados se utilizaron un total de 34 túneles de viento distintos, en la sección de resultados se presentará un resumen de los túneles de viento identificados y los principales temas que se investigan en estos. Se profundizará en la investigación realizada en los 8 túneles de viento que aparecieron cinco o más veces en los artículos estudiados.

Resultados

La búsqueda en base de datos que se llevó a cabo dio lugar a 93 artículos que cumplen con los requisitos mencionados en la sección de metodología. En la figura 1 se muestra un histograma que resume los ejes temáticos encontrados en esas publicaciones. El tema de turbinas de eje vertical fue el de mayor prevalencia, seguido por turbinas de eje horizontal y el estudio de modelos de estelas en turbinas eólicas.

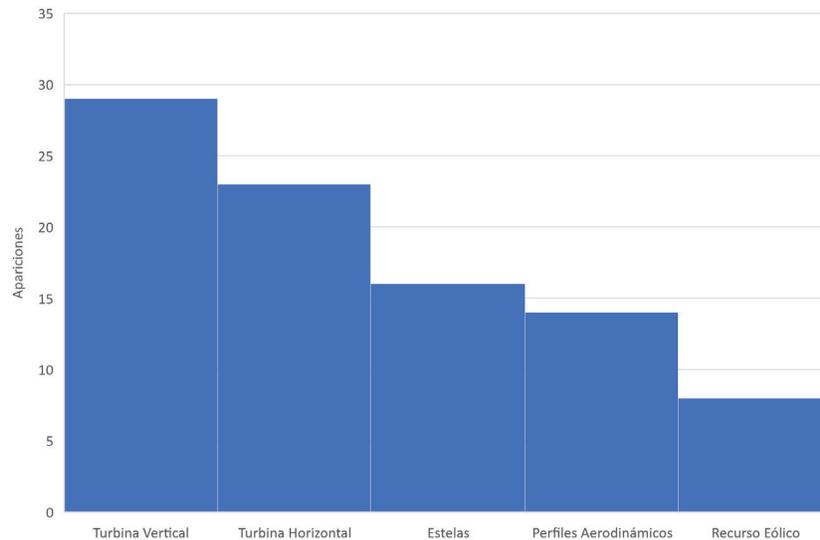


Figura 1. Temáticas tratadas en los artículos analizados.

En el cuadro 1 se muestra un resumen de los túneles de viento más importantes que fueron identificados a partir de la metodología. Se puede destacar que dentro de los túneles identificados existe variedad, ya que se identifican túneles de flujo uniforme y de capa límite, además de túneles de gran escala y de pequeña escala.

Cuadro 1. Principales túneles de viento identificados y sus características.

Instalación	Apariciones*	Tipo de túnel	Tamaño sección de pruebas	Velocidad Máxima	Referencia
Mie University	17	Sección Abierta	Diámetro: 3.6 m Largo: 4.5 m	30 m/s	[10]
Politecnico di Milano	7	Flujo Uniforme y Capa límite	Sección 1: 4 x 4 m Largo: 6 m Sección 2: 14 x 4 m Largo: 36 m	Sección 1: 55 m/s Sección 2: 15 m/s	[6,11]
Kyushu University	7	Capa límite	3.6 x 2 m Largo: 15 m	30 m/s	[12]
Tsinghua University	7	Flujo Uniforme	1.5 x 1.5 m Largo: 2.2 m	10 m/s	[13]
Hong Kong University of Science and Technology	6	Flujo Uniforme	Sección 1: 3 x 2 m Largo: 21 m Sección 2: 5 x 4 m Largo: 41 m	Sección 1: 10 m/s Sección 2: 7.8 m/s	[14,15]
Harbin Institute of Technology	5	Flujo Uniforme	Sección 1: 4 x 3 m Largo: 25 m Sección 2: 6 x 3.6 m Largo: 50 m	Sección 1: 50 m/s Sección 2: 30 m/s	[16]
Mie University	5	Flujo Uniforme	0.65 x 0.65 m Largo: 2 m	52 m/s	[17]
St. Anthony Falls Laboratory	5	Capa límite	1.7 x 1.7 m Largo: 16 m	6 m/s	[18]

* En cuántas publicaciones aparece dentro del grupo de artículos seleccionado.

El resto de los túneles relevantes que corresponden con los criterios descritos en la metodología, pero que no aparecen en cinco o más de los artículos seleccionados, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Otros túneles de viento relevantes.

Instalación	Apariciones	Referencia
Iowa State University	3	[19]
City University of Hong Kong	3	[20]
ABRI, National Cheng Kung University	3	[21]
DAA, National Cheng Kung University	3	[22]
North China Electric Power University	3	[23]
Portland State University	2	[24]
Ruhr-Universität Bochum	2	[25]
Technion Flow Control Lab	2	[26]
TU Delft	2	[27]
Beijing University of Aeronautics & Astronautics	1	[28]
China Aerodynamic Research and Development Center	1	[29]
IET, Chinese Academy of Sciences	1	[30]
Inter-University Research Centre on Building Aerodynamics and Wind Engineering	1	[31]
Technical University of Denmark	1	[6]
Huazhong University of Science and Technology	1	[32]
Iowa State University, Icing Wind Tunnel	1	[33]
WiST Lab, Iowa State University	1	[34]
Von Karman Institute	1	[35]
Department of Engineering Science, National Cheng Kung University	1	[36]
Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO)	1	[37]
Politecnico di Milano, "Sergio De Ponte" Wind Tunnel	1	[38]
Kyushu University, Open Circuit Wind Tunnel	1	[39]
TU Delft, Open Jet Facility	1	[40]
University of Liege	1	[41]
University of Oldenburg	1	[42]
Vrije Universiteit Brussel	1	[35]

Revisión de la investigación en los túneles principales

Túnel de viento de sección abierta, Mie University

En este túnel de viento de 400 kW, de sección abierta y con dimensiones de 3.6 m de diámetro y 4.5 m de largo en la sección de pruebas, se ha utilizado un sistema de LDV (*laser doppler velocimetry*) para la medición del flujo en los perfiles aerodinámicos de turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT), especialmente, durante el fenómeno de fatiga dinámica. Se determinó que la capa límite disminuye al acercarse al borde de ataque, pero aumenta rápidamente a partir de la mitad de la cuerda [43], dándose la separación del flujo al haber recorrido entre el 90-100% de la cuerda [44]. Además, se han hecho estudios respecto al *pitch* del aspa. En ellos se determinó, utilizando sensores de presión en el aspa y por medio de simulación, que para una turbina eólica de eje vertical (VAWT), de aspas rectas, con el perfil NACA0021, el *pitch* no afecta el

coeficiente de potencia al comparar los resultados con una turbina de eje vertical convencional [45]. No obstante, sí afecta el coeficiente de torque y la distribución de presiones, debido a que cuando las aspas están en la región aguas arriba, la diferencia de presión entre las caras del aspa es máxima para un ángulo de *pitch* de 6° , ángulo en el cual también es posible alcanzar el máximo coeficiente de torque [45]. En el mismo ámbito, se demostró con una balanza de seis ejes que, para una turbina eólica flotante fuera de la costa con flujo diagonal, la amplitud de la variación en un sistema cíclico para control del *pitch*, no afecta el coeficiente de potencia ni el coeficiente de empuje [46]. En la figura 2 se muestra un esquema del túnel.

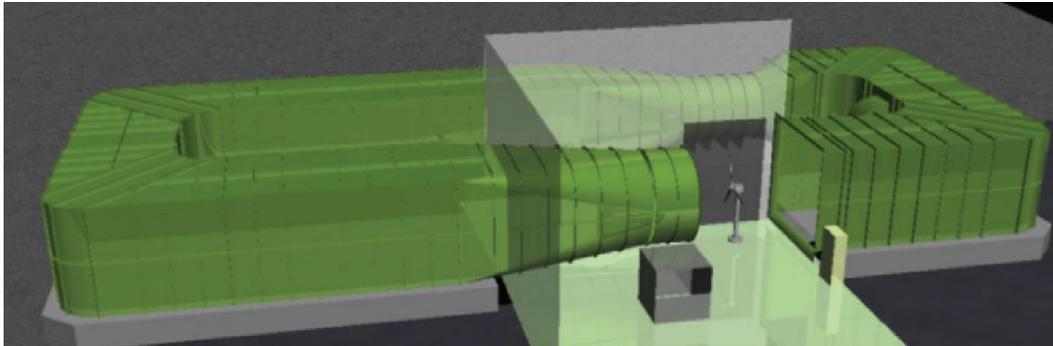


Figura 2. Esquema del túnel de viento de sección abierta de la Universidad de Mie. Fuente: [43]

Túnel de viento Politecnico di Milano

Este túnel de viento, mostrado en la figura 3, es de 1.4 MW con sección de prueba de 3.84 m de alto y 4 m de ancho, se ha enfocado en la prueba de diversas VAWT, con diámetros entre 0.5 m y 3 m. Se utilizaron sensores de presión para caracterizar la estela que producen las turbinas, donde se determinó que dos VAWT separadas horizontalmente 1.2 o 1.3 veces su diámetro y con una configuración donde las turbinas giran a favor del viento que fluye entre ellas, producen una estela similar a la de una VAWT aislada [47]. Por otra parte, si se separan 1.3 diámetros, pero giran en contra del viento que fluye en el espacio entre ellas, las estelas se fusionan en una sola más estrecha en comparación con la que produce una turbina aislada. Otra investigación utilizó un sistema de visión y un análisis modal (*Operational modal Analysis*) para estudiar las vibraciones en una VAWT. La frecuencia de los modos se comparó con datos medidos por acelerómetros y galgas extensiométricas, más una simulación en el software HAWC2 [48]. Los tres resultados fueron similares, excepto en el modo 4, donde el error entre métodos llegó hasta 16.18%. Otro estudio en el túnel comparó una turbina del tipo H-Darrieus y otra del tipo Troposkien, demostrando que ambas formas producen el mismo empuje, pero la segunda genera más potencia si el flujo supera los 6.5 m/s [49]. Además, la Troposkien elimina rápidamente los torbellinos en la región de la punta, mientras que la turbina H-Darrieus, mantiene torbellinos continuamente. Finalmente, la investigación en [50] se enfocó en detallar el proceso de diseño de una VAWT con perfil NACA0021 y con control individual del *pitch* (VAWT-IPC), esto con el objetivo de utilizarla en investigaciones posteriores para la verificación de datos teóricos.

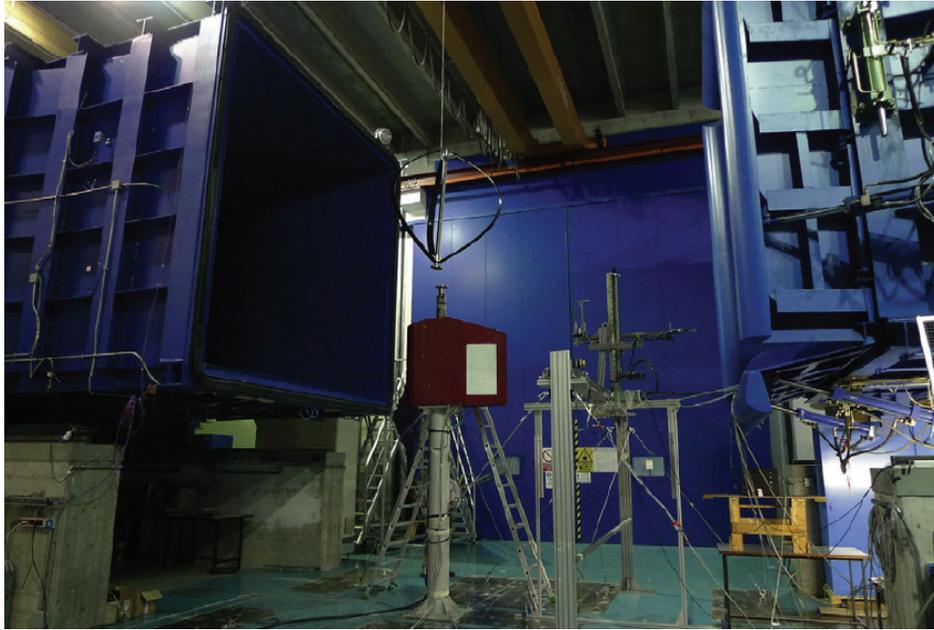


Figura 3. Túnel de viento del Politécnico di Milano. Fuente: [49].

Túnel de viento Kyushu University

Este túnel de capa límite de 264 kW y con 3.6 m de ancho, 2 m de alto y 15 m de largo en la zona de pruebas (en la figura 4 se muestran más características) se ha utilizado en diversas investigaciones enfocadas en los concentradores de flujo tipo *Wind Lens*. En [51] se utilizaron álabes estabilizadores de vórtices y diferentes geometrías de borde en una WLT (*Wind Lens turbine*), con el objetivo de aumentar la potencia de la turbina. Al utilizar 6 álabes y un *Wind Lens* del tipo Ci10 (borde circular), se aumentó la potencia en 3.8%, por otra parte, al utilizar un lente dodecagonal y sin álabes estabilizadores, se aumentó la potencia en 1.5%. También, se experimentó colocando tres WLT en una configuración SBS (*side by side* en inglés), una triangular a 60° y otra triangular a 90°, determinando que la configuración SBS genera 12% más potencia en comparación a sumar tres WLT individuales [52].

En el mismo ámbito, en [53] se utilizó un anemómetro de hilo caliente junto a un mecanismo móvil, con el objetivo de estudiar el efecto del *Wind Lens* en flujo turbulento. Se determinó que el *Wind Lens* CiiB5 aumentó la velocidad del viento en al menos 20%, al tener 5% de intensidad de turbulencia y que el porcentaje se incrementa al aumentar la intensidad de turbulencia. Por otra parte, en [54] se desarrolló y se puso a prueba experimentalmente, un modelo matemático para analizar turbinas de eje horizontal con el rotor aguas debajo de la torre (*Downwind*). Los cálculos teóricos de la velocidad del viento y el empuje del rotor tuvieron una precisión de 30% en comparación a los resultados experimentales, porcentaje mayor al que se obtiene si se utilizara el método clásico de BEM (*Blade Element Momentum*). Por último, el túnel fue utilizado para validar un simulador por LES (*Large Eddy Simulation*), el cual se aplicó para simular cómo es afectada la estela de una HAWT en función del perfil de velocidades del flujo de entrada [55]. Se determinó que la estela tiene el mismo comportamiento sin importar el perfil del flujo de entrada.

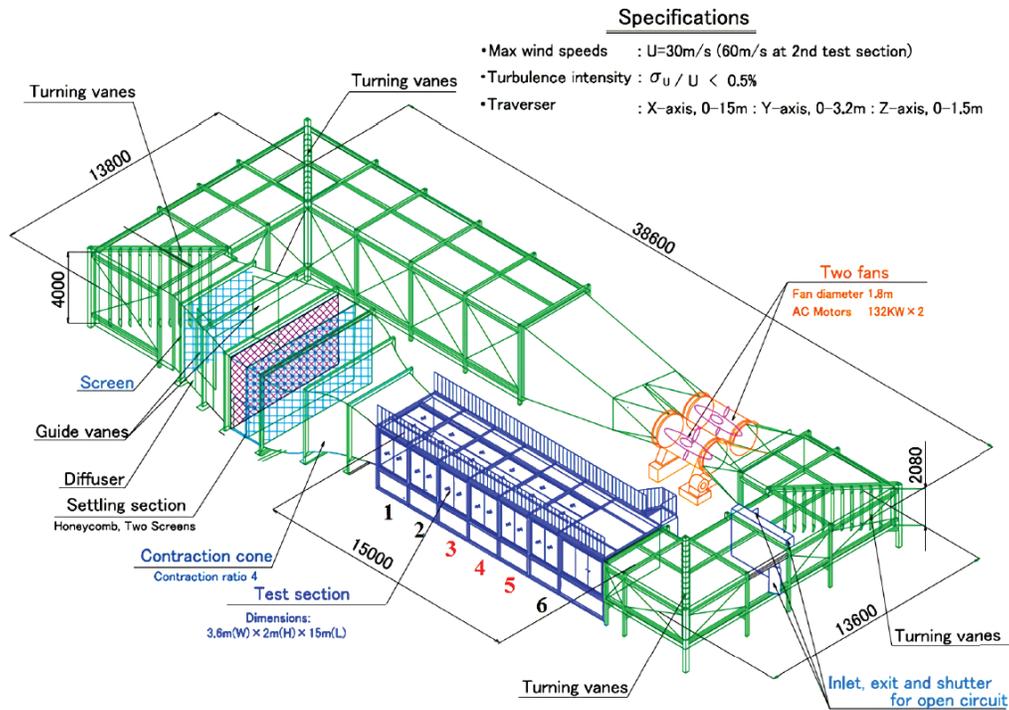


Figura 4. Túnel de viento de la Universidad de Kyushu. Fuente: [55].

Túnel de viento Tsinghua University

El túnel del laboratorio de la Universidad de Tsinghua, mostrado en la figura 5, es de 44 kW, de circuito abierto, 2 m de largo y 1.5 m de ancho y alto en la sección de pruebas. Este se ha utilizado para experimentar con diseños originales de diferentes turbinas. En [56] se determinó que para una HAWT con perfil NACA0012 y rotor plegable, el coeficiente de potencia es máximo cuando el ángulo de plegado es de 25° , y se reduce en un 72.8% si el ángulo es de 0° . Este mismo diseño reduce en 24.1% la carga flexionante en las aspas de la turbina, cálculo que fue basado en un modelo mejorado del método BEM. Por otra parte, se determinó que para una VAWT con perfil NACA0015 de aspas rectas y rotor plegable, el coeficiente de potencia es máximo cuando el ángulo de plegado es de 8° , pero es 62.5% menor a 2° y 59% menor a 13° [57]. Además, en [58] se experimentó con una VAWT a la cual se le agregaron aspas secundarias móviles, de tal manera que la turbina pudiera variar entre el tipo Savonius y H-Darrieus, permitiendo que esta se autoinicie. Los resultados demostraron gráficamente que el diseño propuesto obtiene un mayor coeficiente de potencia y posee mejor control de potencia en comparación con la turbina H-Darrieus convencional. En [59] se aplicó una distribución normal asimétrica (*Skew-normal distribution*) para construir un modelo matemático que predijera la distribución de velocidades en la estela de una HAWT en condiciones de desalineamiento respecto a la dirección del flujo (*Yawed conditions*). Al obtener datos experimentales con una HAWT de dos aspas con perfil S826, y al compararlos con tres modelos teóricos diferentes, se concluyó que el modelo propuesto obtiene los porcentajes de error más bajos, especialmente, cuando se aplican ángulos de yaw altos.



Figura 5. Túnel de viento de la Universidad de Tsinghua. Fuente: [58].

Túnel de viento Hong Kong University of Science and Technology

Este túnel de viento mostrado en la figura 6, posee dos secciones de prueba cuyas medidas se indican en el Cuadro 1. En él se han realizado varias pruebas en una VAWT de tres aspas rectas, con perfil NACA0018, una longitud de aspa de 1 metro y con un rotor de alta solidez. En [60] se utilizaron datos experimentales para comprarlos con una simulación por LES. Se determinó que la simulación predice correctamente el flujo en la zona aguas arriba, pero no lo logra en la zona aguas abajo, especialmente porque entre más solidez tiene la turbina, existen más vórtices que complican el flujo y aumentan la dificultad de realizar la simulación numérica. Además, se desarrolló un modelo híbrido de DMST (*Double-disk multiple steam-tube*) basado en coeficientes dinámicos de la fuerza aerodinámica, los cuales se determinan de forma experimental con el objetivo de analizar los ángulos de *pitch* de la turbina descrita anteriormente [61]. La investigación concluyó que estos coeficientes son consistentes a bajas TSR (*Tip speed ratio*), y que el modelo se puede utilizar para calcular los ángulos óptimos de *pitch*. Este mismo modelo fue aplicado para desarrollar una expresión que describiera el ángulo óptimo de *pitch* en función del ángulo azimutal [62]. Luego, se implementó un sistema de control de *pitch* que utiliza esta función en la misma turbina, aumentando el coeficiente de potencia en 78.6% y 45.4% en comparación a cuando el ángulo es de 0° y cuando la función del ángulo es sinusoidal. Estudiando una turbina de otro tipo, en [14] se analiza el efecto de la estela de una HAWT de tres aspas sobre otra turbina aguas abajo, ambas con un diámetro de 360mm. Mediante el uso de sensores de presión y un sistema PIV (*Particle image velocimetry*), se determinó que la potencia generada por la turbina aguas abajo disminuye debido a bajas velocidades y turbulencias en la estela, pero al aumentar la distancia entre turbinas, la potencia aumenta gradualmente.

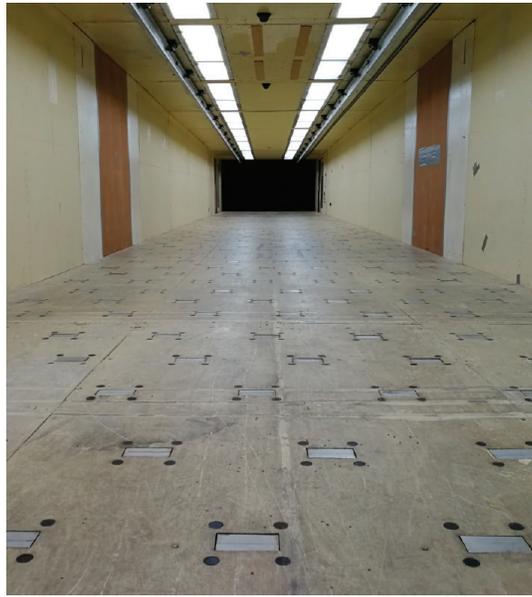


Figura 6. Interior del túnel de viento en la *Hong Kong University of Science and Technology*. Fuente: [14].

Túnel de viento Harbin Institute of Technology

Como se indica en el cuadro 1, este túnel posee dos secciones de prueba y en una de ellas, el túnel se combina con un canal de olas (ver figura 7), por lo que se han realizado investigaciones diversas respecto a recurso eólico y su relación con el recurso marítimo. En [63] se estudian las características de los flujos de aire sobre edificios altos con techo plano, concluyéndose que entre mayor es la razón de altura-profundidad y ancho-profundidad del edificio, mayor es el factor de amplificación de la energía del flujo. También, en [64] se analizó por medio de sensores de posición, acelerómetros y válvulas extensiométricas, el rendimiento estructural de una turbina eólica empotrada en arena. Se determinó que, a largo plazo, la frecuencia natural de la turbina aumenta y la tasa de amortiguamiento disminuye, lo que afecta la amplitud de la respuesta estructural y también aumenta la deformación acumulada. En el campo de las turbinas eólicas marinas (*offshore*), se determinó con sensores de presión, que la estela que produce la plataforma no debe ignorarse [65]. La estela de la plataforma afecta la de la turbina y genera una distribución de déficit de velocidad diferente a la distribución Gaussiana de la turbina aislada, por lo que se propuso un modelo matemático para explicarla. Este modelo aún requiere una mayor profundidad en su interpretación física. Por último, en [66] se integra una turbina eólica marina del tipo TLP (*tension leg platform*) y un generador mareomotriz, para formar un sistema llamado TWWC (*Tension leg platform-Wind turbine-Wave Energy converter-Combination*). Utilizando un modelo numérico y datos experimentales, se concluyó que el modelo teórico predice correctamente la respuesta dinámica del sistema y, a velocidad del viento nominal, la potencia de la turbina es la principal contribución al conjunto TWWC.



Figura 7. Túnel de viento y canal de olas del *Harbin Institute of Technology*. Fuente: [65].

Túnel de viento tipo Göttingen Mie University

El túnel de viento tipo Göttingen de la Universidad de Mie, mostrado en la figura 8, es de 55 kW y posee una sección de prueba cuadrada de 0.65 m. En [17] se analizó experimental y numéricamente una VAWT de aspas rectas, en particular, durante el fenómeno de fatiga dinámica. Se determinó que al tener TSR menores a 1.6, la separación del flujo se observa desde el borde de ataque hasta el borde de salida, sin embargo, para TSR superiores, el rango de ángulos azimutales que ocasionan la separación del flujo se hace más estrecho. Dos investigaciones utilizaron sensores de presión en las aspas de una turbina con el objetivo de analizar el comportamiento de un perfil aerodinámico propio, denominado UMY02-T01-26 [67,68]. En [67] se determinó que si $Re = 0.5 \times 10^5$ y se utiliza una cinta en el aspa para generar una capa límite turbulenta, el coeficiente de sustentación es mayor para ángulos de ataque entre 0° y 13° , en comparación a si no se colocara la cinta. Además, bajo el fenómeno de pérdida dinámica y con $Re = 1.5 \times 10^5$, el flujo se separa al cubrir más del 10% de la cuerda en la dirección de aumento del ángulo de ataque [68]. Dejando a un lado las turbinas y los perfiles aerodinámicos, en [69] se estudia el flujo de aire a través de colinas en 2D, ambas con una altura de $H = 50$ mm, pero una con un ancho de H y otra con ancho $2H$. Utilizando un sistema PIV, se determinó que al subir la colina el flujo aumenta su velocidad hasta separarse en la cima, donde luego se obtuvo que la zona de recirculación en la colina de H de ancho es aproximadamente 80% más grande que la que se genera en la colina de $2H$ de ancho.

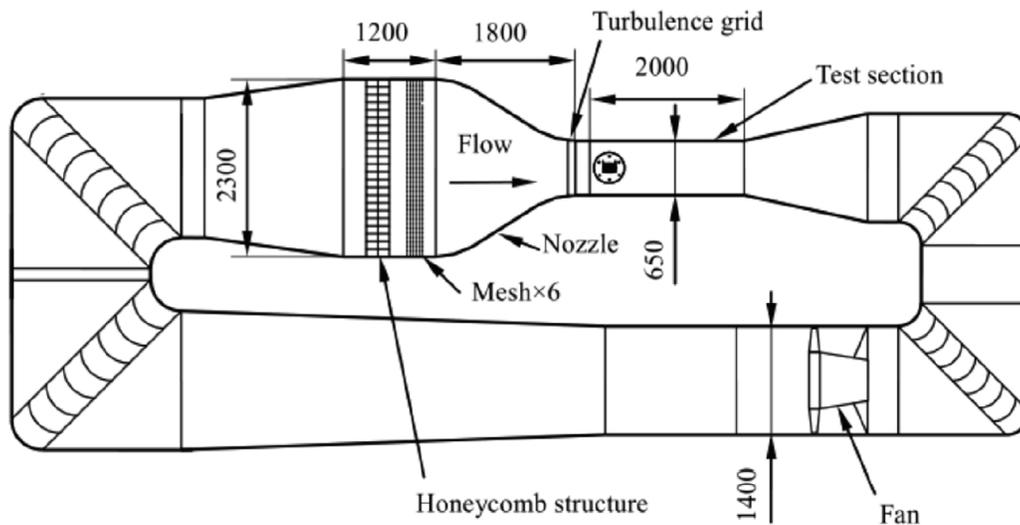


Figura 8. Esquema del túnel de viento tipo Göttingen de la Universidad de Mie, acotado en mm. Fuente: [68].

Túnel de viento St. Anthony Falls Laboratory

En este túnel con sección de prueba cuadrada de 1.7 m de lado y de circuito cerrado, se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas en las estelas que generan las turbinas eólicas. En [70] se comparan las estelas que produce una HAWT cuando posee manejo activo (rotor impulsado por un servomotor) o cuando posee manejo pasivo (rotor impulsado únicamente por el flujo de aire) en los experimentos de túnel de viento. Utilizando un anemómetro de hilo caliente, se concluyó que la velocidad promedio de la estela es bastante similar en ambos casos. También, se desarrolló y validó un modelo matemático en 3D para analizar la estela de una o varias turbinas [71] El modelo se validó al utilizar dos arreglos geométricos de 30 turbinas, determinando la velocidad de la estela con un error máximo de 22%, siendo el modelo mucho más preciso en las primeras hileras de la configuración. En el mismo ámbito, en [18] se analizan 5 arreglos de HAWT con perfil S826 y con un diámetro de 0.2 m, con el objetivo de observar el efecto de las estelas. El estudio determinó que al utilizar tres turbinas y al colocar la segunda alejada de la línea que une las otras dos, en al menos un diámetro, la potencia normalizada total aumenta en 20.41%, comparado a si las tres estuvieran alineadas. Fuera de la temática de las estelas, en [72] se tomaron mediciones en una turbina Clipper Liberty C96 de 2.5 MW, y también se construyó un modelo a escala para tomar las mismas medidas en el túnel de viento. Estas mediciones se realizaron con el objetivo de predecir el rendimiento de la turbina basándose en la velocidad de entrada. Ambas mediciones determinaron que, para predecir la potencia de salida, es óptimo utilizar la velocidad medida a una altura de aproximadamente 1.3 veces la altura al centro del rotor, debido a que esta posee mayor correlación con la potencia. En la figura 9 se muestra el interior del túnel.



Figura 9. Prueba de dos HAWT en el túnel del *St. Anthony Falls Laboratory*. Fuente: [18].

Comentarios finales

Mediante la revisión de literatura realizada en este artículo, se analizaron las publicaciones recientes de ocho túneles de viento de alta relevancia en la investigación en energía eólica. El principal tema de estudio en los distintos túneles de viento consiste en mediciones experimentales del desempeño de turbinas de eje horizontal y vertical (52 apariciones). Respecto a este tema, la Universidad de Mie tiene la mayor cantidad de publicaciones, ya que suma 16 artículos entre sus dos túneles de viento (sección abierta y tipo Göttingen).

En la mayoría de los túneles estudiados se encontraron artículos para las distintas temáticas en energía eólica. Excepciones a esto se pueden ver en el túnel del Politecnico di Milano que se concentra principalmente en el estudio de turbinas verticales, y con el túnel de la Universidad de Kyushu donde la mayoría de la investigación se centra en el estudio de turbinas con *wind lens*.

El catálogo de túneles de viento presentado en este artículo puede ser usado como punto de partida para ampliar la red de contactos de las personas que investigan en energía eólica, pues muestra la diversidad en tamaños, tipos y temas de investigación que se desarrollan en diferentes latitudes, alrededor de todo el planeta. Esto favorecerá eventualmente posibles colaboraciones internacionales sobre el tema de investigación en energía eólica.

Referencias

- [1] J. K. Calautit, H. N. Chaudhry, B. R. Hughes, and L. F. Sim, "A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 125, pp. 180–194, 2014, doi: 10.1016/j.jweia.2013.12.010.
- [2] O. D. Almeida, F. C. De Miranda, O. F. Neto, and F. G. Saad, "Low Subsonic Wind Tunnel – Design and Construction," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 10, feb 2018, doi: 10.5028/jatm.v10.716.
- [3] J. G. Monge Gapper, "Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad," *Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 16, pp. 45–54, 2006, doi: 10.15517/RING.V16I2.665.

- [4] K. Dai, A. Bergot, C. Liang, W. N. Xiang, and Z. Huang, "Environmental issues associated with wind energy – A review," *Renewable Energy*, vol. 75, pp. 911–921, mar 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.074.
- [5] M. S. Nazir, A. J. Mahdi, M. Bilal, H. M. Sohail, N. Ali, and H. M. Iqbal, "Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm – A review," *Science of The Total Environment*, vol. 683, pp. 436–444, sep 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.274.
- [6] I. Bayati, M. Belloli, L. Bernini, and A. Zasso, "Aerodynamic design methodology for wind tunnel tests of wind turbine rotors," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 167, pp. 217–227, aug 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.05.004.
- [7] J. B. Barlow, W. H. Rae, and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & Sons, Ltd, 3rd ed., 1999.
- [8] P. Bradshaw and R. Pankhurst, "The design of low-speed wind tunnels," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 5, pp. 1–69, jan 1964, doi: 10.1016/0376-0421(64)90003-X.
- [9] S. Jara Romero and D. Millacáriz González, *Diseño y Construcción de un Túnel de Viento con Fines Académicos para el Estudio de Flujos Externos*. PhD thesis, Universidad Tecnológica Metropolitana, 2018.
- [10] Q. Li et al., "Study on power performance for straight-bladed vertical axis wind turbine by field and wind tunnel test," *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 291–300, may 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.01.002.
- [11] L. Battisti et al., "Wind tunnel testing of the DeepWind demonstrator in design and tilted operating conditions," *Energy*, vol. 111, pp. 484–497, sep 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.05.080.
- [12] U. Gölttenbott, Y. Ohya, S. Yoshida, and P. Jamieson, "Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 25–34, nov 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.014.
- [13] W. Xie, P. Zeng, and L. Lei, "Wind tunnel testing and improved blade element momentum method for umbrella-type rotor of horizontal axis wind turbine," *Energy*, vol. 119, pp. 334–350, jan 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.051.
- [14] H. Tang, K. M. Lam, K. M. Shum, and Y. Li, "Wake Effect of a Horizontal Axis Wind Turbine on the Performance of a Downstream Turbine," *Energies*, vol. 12, p. 2395, jun 2019, doi: 10.3390/en12122395.
- [15] Y. X. Peng, Y. L. Xu, S. Zhan, and K. M. Shum, "High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Aerodynamic force measurements," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 184, pp. 34–48, jan 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2018.11.005.
- [16] D. W. Wekesa, C. Wang, Y. Wei, and W. Zhu, "Experimental and numerical study of turbulence effect on aerodynamic performance of a small-scale vertical axis wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 157, pp. 1–14, oct 2016, doi: 10.1016/j.jweia.2016.07.018.
- [17] Q. Li, T. Maeda, Y. Kamada, Y. Hiromori, A. Nakai, and T. Kasuya, "Study on stall behavior of a straight-bladed vertical axis wind turbine with numerical and experimental investigations," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 164, pp. 1–12, may 2017, doi: 10.1016/j.jweia.2017.02.005.
- [18] B. Dou, M. Guala, P. Zeng, and L. Lei, "Experimental investigation of the power performance of a minimal wind turbine array in an atmospheric boundary layer wind tunnel," *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 906–919, sep 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.06.056.
- [19] Z. Wang, A. Ozbay, W. Tian, and H. Hu, "An experimental study on the aerodynamic performances and wake characteristics of an innovative dual-rotor wind turbine," *Energy*, vol. 147, pp. 94–109, mar 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.020.
- [20] H. Peng and H. Lam, "Turbulence effects on the wake characteristics and aerodynamic performance of a straight-bladed vertical axis wind turbine by wind tunnel tests and large eddy simulations," *Energy*, vol. 109, pp. 557–568, aug 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.04.100.
- [21] M. H. Lee, Y. Shiah, and C. J. Bai, "Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 149, pp. 17–29, feb 2016, doi: 10.1016/j.jweia.2015.12.002.
- [22] W. C. Wang, J. J. Wang, and W. T. Chong, "The effects of unsteady wind on the performances of a newly developed cross-axis wind turbine: A wind tunnel study," *Renewable Energy*, vol. 131, pp. 644–659, feb 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.061.
- [23] X. Li, K. Yang, and X. Wang, "Experimental and Numerical Analysis of the Effect of Vortex Generator Height on Vortex Characteristics and Airfoil Aerodynamic Performance," *Energies*, vol. 12, p. 959, mar 2019, doi: 10.3390/en12050959.

- [24] S. Rockel, J. Peinke, M. Hölling, and R. B. Cal, "Wake to wake interaction of floating wind turbine models in free pitch motion: An eddy viscosity and mixing length approach," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 666–676, jan2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.012.
- [25] G. Vita, A. Šarkić-Glumac, H. Hemida, S. Salvadori, and C. Baniotopoulos, "On the Wind Energy Resource above High-Rise Buildings," *Energies*, vol. 13, p. 3641, jul 2020, doi: 10.3390/en13143641.
- [26] H. F. Müller-Vahl, C. N. Nayeri, C. O. Paschereit, and D. Greenblatt, "Dynamic stall control via adaptive blowing," *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 47–64, nov 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.05.053.
- [27] D. Baldacchino, C. Ferreira, D. D. Tavernier, W. Timmer, and G. J. W. van Bussel, "Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil," *Wind Energy*, vol. 21, pp. 745–765, sep 2018, doi: 10.1002/we.2191.
- [28] L. Zhang, X. Li, S. Li, J. Bai, and J. Xu, "Unstable aerodynamic performance of a very thick wind turbine airfoil CAS-W1-450," *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 1112–1120, mar 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.08.086.
- [29] Q. Li, Z. Shu, and F. Chen, "Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation," *Applied Energy*, vol. 165, pp. 777–788, mar 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.114.
- [30] G. Wang, L. Zhang, and W. Z. Shen, "LES simulation and experimental validation of the unsteady aerodynamics of blunt wind turbine airfoils," *Energy*, vol. 158, pp. 911–923, sep 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.093.
- [31] H. Kozmar, D. Allori, G. Bartoli, and C. Borri, "Wind characteristics in wind farms situated on a hilly terrain," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 174, pp. 404–410, mar 2018, doi: 10.1016/j.jweia.2018.01.008.
- [32] J. Ye et al., "Effects of divergent angle on the flow behaviors in low speed wind accelerating ducts," *Renewable Energy*, vol. 152, pp. 1292–1301, jun 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.068.
- [33] L. Gao, Y. Liu, L. Ma, and H. Hu, "A hybrid strategy combining minimized leading-edge electric-heating and superhydro-/ice-phobic surface coating for wind turbine icing mitigation," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 943–956, sep 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.112.
- [34] A. Downey, S. Laflamme, and F. Ubertini, "Experimental wind tunnel study of a smart sensing skin for condition evaluation of a wind turbine blade," *Smart Materials and Structures*, vol. 26, p. 125005, dec 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa9349.
- [35] A. Vergaerde, T. De Troyer, A. Carbó Molina, L. Standaert, and M. Runacres, "Design, manufacturing and validation of a vertical-axis wind turbine setup for wind tunnel tests," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 103949, oct 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.103949.
- [36] Y. T. Wu, C. Y. Lin, and C. M. Hsu, "An Experimental Investigation of Wake Characteristics and Power Generation Efficiency of a Small Wind Turbine under Different Tip Speed Ratios," *Energies*, vol. 13, p. 2113, apr 2020, doi: 10.3390/en13082113.
- [37] M. Ge, Y. Wu, Y. Liu, and X. I. Yang, "A two-dimensional Jensen model with a Gaussian-shaped velocity deficit," *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 46–56, oct 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.127.
- [38] G. Tomasini, D. Tarsitano, and S. Giappino, "A centimetre-scale bi-directional wind turbine for energy harvesting applications: design and experimental tests," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, p. 105048, oct 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab38f7.
- [39] T. Uchida and K. Sugitani, "Numerical and Experimental Study of Topographic Speed-Up Effects in Complex Terrain," *Energies*, vol. 13, p. 3896, jul 2020, doi: 10.3390/en13153896.
- [40] N. Chrysochoidis-Antsos, A. V. Amoros, G. J. van Bussel, S. M. Mertens, and A. J. van Wijk, "Wind resource characteristics and energy yield for micro wind turbines integrated on noise barriers – An experimental study," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 203, p. 104206, aug 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104206.
- [41] G. Vita, H. Hemida, T. Andrienne, and C. Baniotopoulos, "The effect of the integral length scale of turbulence on a wind turbine aerofoil," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 204, p. 104235, sep 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104235.
- [42] S. Rockel, J. Peinke, M. Hölling, and R. B. Cal, "Dynamic wake development of a floating wind turbine in free pitch motion subjected to turbulent in flow generated with an active grid," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 1–16, nov 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.05.016.
- [43] Q. Li et al., "Laser Doppler Velocimetry (LDV) measurements of airfoil surface flow on a Horizontal Axis Wind Turbine in boundary layer," *Energy*, vol. 183, pp. 341–357, sep 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.150.
- [44] Q. Li et al., "Experimental investigations of airfoil surface flow of a horizontal axis wind turbine with LDV measurements," *Energy*, vol. 191, p. 116558, jan 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116558.

- [45] Y. Yang, Z. Guo, Q. Song, Y. Zhang, and Q. Li, "Effect of Blade Pitch Angle on the Aerodynamic Characteristics of a Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine Based on Experiments and Simulations," *Energies*, vol. 11, p. 1514, jun 2018, doi: 10.3390/en11061514.
- [46] L. Q. Sang, M. Takao, Y. Kamada, and Q. Li, "Experimental investigation of the cyclic pitch control on a horizontal axis wind turbine in diagonal in flow wind condition," *Energy*, vol. 134, pp. 269–278, sep 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.042.
- [47] A. Vergaerde et al., "Experimental characterization of the wake behind paired vertical-axis wind turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 206, p. 104353, nov 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104353.
- [48] N. Najafi and U. S. Paulsen, "Operational modal analysis on a VAWT in a large wind tunnel using stereo vision technique," *Energy*, vol. 125, pp. 405–416, apr 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.133.
- [49] L. Battisti et al., "Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 425–444, sep 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.098.
- [50] I. Bayati, S. Foletti, D. Tarsitano, and M. Belloli, "A reference open data vertical axis wind turbine, with individual pitch control, for code validation purposes," *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 711–720, jan 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.08.090.
- [51] K. Watanabe, Y. Ohya, and T. Uchida, "Power Output Enhancement of a Ducted Wind Turbine by Stabilizing Vortices around the Duct," *Energies*, vol. 12, p. 3171, aug 2019, doi: 10.3390/en12163171.
- [52] K. Watanabe and Y. Ohya, "Multirotor Systems Using Three Shrouded Wind Turbines for Power Output Increase," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 141, may 2019, doi: 10.1115/1.4042971.
- [53] G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto, and F. Hernández-Castro, "Effect of a wind lens diffuser on turbulent flow," *Uniciencia*, vol. 35, pp. 1–18, jul 2021, doi: 10.15359/ru.35-2.7.
- [54] S. Yoshida, K. Fujii, M. Hamasaki, and A. Takada, "Effect of Rotor Thrust on the Average Tower Drag of Downwind Turbines," *Energies*, vol. 12, p. 227, jan 2019, doi: 10.3390/en12020227.
- [55] T. Uchida, "Effects of Inflow Shear on Wake Characteristics of Wind-Turbines over Flat Terrain," *Energies*, vol. 13, p. 3745, jul 2020, doi: 10.3390/en13143745.
- [56] H. Meng, Z. Ma, B. Dou, P. Zeng, and L. Lei, "Investigation on the performance of a novel forward-folding rotor used in a downwind horizontal-axis turbine," *Energy*, vol. 190, p. 116384, jan 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116384.
- [57] J. Guo, P. Zeng, and L. Lei, "Performance of a straight-bladed vertical axis wind turbine with inclined pitch axes by wind tunnel experiments," *Energy*, vol. 174, pp. 553–561, may 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.177.
- [58] H. Su, B. Dou, T. Qu, P. Zeng, and L. Lei, "Experimental investigation of a novel vertical axis wind turbine with pitching and self-starting function," *Energy Conversion and Management*, vol. 217, p. 113012, aug 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113012.
- [59] B. Dou, M. Guala, L. Lei, and P. Zeng, "Wake model for horizontal-axis wind and hydrokinetic turbines in yawed conditions," *Applied Energy*, vol. 242, pp. 1383–1395, may 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.164.
- [60] Y. X. Peng, Y. L. Xu, S. Zhu, and C. Li, "High-solidity straight-bladed vertical axis wind turbine: Numerical simulation and validation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 193, p. 103960, oct2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.103960.
- [61] Y. X. Peng, Y. L. Xu, and S. Zhan, "A hybrid DMST model for pitch optimization and performance assessment of high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines," *Applied Energy*, vol. 250, pp. 215–228, sep 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.127.
- [62] Y. L. Xu, Y. X. Peng, and S. Zhan, "Optimal blade pitch function and control device for high-solidity straight-bladed vertical axis wind turbines," *Applied Energy*, vol. 242, pp. 1613–1625, may 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.151.
- [63] H. Peng, S. Dai, K. Lin, G. Hu, and H. Liu, "Experimental investigation of wind characteristics and wind energy potential over rooftops: Effects of building parameters," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 205, p. 104304, oct 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104304.
- [64] K. Lin, S. Xiao, A. Zhou, and H. Liu, "Experimental study on long-term performance of monopile-supported wind turbines (MWTs) in sand by using wind tunnel," *Renewable Energy*, vol. 159, pp. 1199–1214, oct 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.06.034.
- [65] X. L. Xiong, P. Lyu, W. L. Chen, and H. Li, "Self-similarity in the wake of a semi-submersible offshore wind turbine considering the interaction with the wake of supporting platform," *Renewable Energy*, vol. 156, pp. 328–341, aug 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.071.

- [66] N. Ren, Z. Ma, B. Shan, D. Ning, and J. Ou, "Experimental and numerical study of dynamic responses of a new combined TLP type floating wind turbine and a wave energy converter under operational conditions," *Renewable Energy*, vol. 151, pp. 966–974, may 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.11.095.
- [67] Q. Li, Y. Kamada, T. Maeda, and Y. Nishida, "Experimental investigations of boundary layer impact on the airfoil aerodynamic forces of Horizontal Axis Wind Turbine in turbulent inflows," *Energy*, vol. 135, pp. 799–810, sep 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.174.
- [68] Q. Li, Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, and Y. Nishida, "Effect of turbulent inflows on airfoil performance for a Horizontal Axis Wind Turbine at low Reynolds numbers (Part II: Dynamic pressure measurement)," *Energy*, vol. 112, pp. 574–587, oct 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.126.
- [69] Y. Kamada, Q. Li, T. Maeda, and K. Yamada, "Wind tunnel experimental investigation of flow field around two-dimensional single hill models," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 1107–1118, jun 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.083.
- [70] B. Dou, Z. Yang, M. Guala, T. Qu, L. Lei, and P. Zeng, "Comparison of Different Driving Modes for the Wind Turbine Wake in Wind Tunnels," *Energies*, vol. 13, p. 1915, apr 2020, doi: 10.3390/en13081915.
- [71] H. Sun and H. Yang, "Numerical investigation of the average wind speed of a single wind turbine and development of a novel three-dimensional multiple wind turbine wake model," *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 192–203, mar2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.08.122.
- [72] K. B. Howard and M. Guala, "Upwind preview to a horizontal axis wind turbine: a wind tunnel and field-scale study," *Wind Energy*, vol. 19, pp. 1371–1389, aug 2016, doi: 10.1002/we.1901.

La economía circular como alternativa hacia un nuevo modelo para la actividad industrial sustentable

The circular economy as an alternative towards a new model for sustainable industrial activity

Mariana Marcelino-Aranda¹, Alberto Macías Alcibar²,
María Concepción Martínez-Rodríguez³, Alejandro D. Camacho⁴

Fecha de recepción: 4 de abril de 2021
Fecha de aprobación: 11 de agosto de 2021

Marcelino-Aranda, M; Alcibar, A.M; Martínez-Rodríguez, M.C;
Camacho, A.D. La economía circular como alternativa hacia
un nuevo modelo para la actividad industrial sustentable.
Tecnología en Marcha. Vol. 35-3. Julio-Setiembre 2022. Pág.
195-206.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i3.5599>

- 1 Instituto Politécnico Nacional. UPIICSA. México. Correo electrónico: mmarcelino@ipn.mx
 <https://orcid.org/0000-0003-4997-0617>
- 2 Instituto Politécnico Nacional. UPIICSA. México. Correo electrónico: maalberto.rt@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0400-110X>
- 3 Instituto Politécnico Nacional. CIEMAD. México. Correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx
 <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>
- 4 Instituto Politécnico Nacional. ENCB. México. Correo electrónico: adcamachov@yahoo.com.mx
 <https://orcid.org/0000-0003-4791-1912>

Palabras clave

Economía circular; economía lineal; industria sustentable.

Resumen

El modelo de economía lineal en el cual se compra usa y desecha, ha ocasionado un uso excesivo de los recursos naturales, la contaminación de suelo, aire y agua por una gran cantidad de desperdicios. Por otro lado, la economía circular plantea una forma diferente para utilizar los recursos naturales y mantener la actividad económica. Este documento busca describir y analizar las bases conceptuales de la economía circular. Se presenta una revisión bibliográfica en bases de datos de alto impacto sobre el tema y su papel en la actividad industrial sustentable. Durante las dos últimas décadas, la economía circular y las líneas de pensamiento relacionadas han adquirido mayor interés en la industria, academia, y a nivel gobierno. La economía circular se enfoca en desplazar la presión ambiental del crecimiento económico, lo cual, promueve sistemas de producción basados en la reducción de desechos y en la optimización del aprovechamiento de los recursos, al utilizar productos y servicios en bucles mediante el cierre de ciclos de vida de los productos ayuda a dirigir hacia un desarrollo regenerativo y por tanto, un bienestar social y económico con impacto global. Los países de la Unión Europea y China han implementado la economía circular a nivel micro, meso y macro. La economía circular proporciona una alternativa viable para sustituir el modelo lineal de economía.

Keywords

Circular economy; linear economy; sustainable industry.

Abstract

The linear economy model in which products are purchased, used, and thrown away, has caused excessive use of natural resources, soil, air, and water pollution due to excessive waste. On the other hand, the circular economy poses a different way to use natural resources and maintain economic activity. This document seeks to describe and analyse the conceptual basis of the circular economy. We review the information on the subject taken from high-impact databases and its role in sustainable industrial activity. Over the past two decades, the circular economy and related lines of thought have gained more significant interest in the industry, academia, and at the government level. The circular economy focuses on shifting the environmental pressure of economic growth. It promotes production systems based on waste reduction and optimization of natural resource utilization. Using products and services in loops by closing product life cycles helps lead towards regenerative development and, therefore, social and economic well-being with global impact. The European Union and China have implemented the circular economy at the micro, middle, and macro level. The circular economy provides a viable alternative to replace the linear model of economics.

Introducción

Los sistemas de producción se adaptan a las demandas de la sociedad. En la época de la Revolución Industrial, el uso de nuevas materias primas, aumento y diversificación de productos trajo consigo la generación de problemas de contaminación y manejo de desperdicios. Es hasta después de la Segunda Guerra Mundial que se crea una conciencia colectiva en pro de

disminuir y controlar la contaminación y buscar una gestión de desperdicios [1]. Aunado a ello, desde 1972, el Club de Roma planteó la siguiente tesis: “en un planeta limitado, las dinámicas de crecimiento exponencial - población y producto per cápita - no son sostenibles” [2].

En la década de 1970, en Estados Unidos y Europa las medidas de control e inspección se convirtieron en asuntos políticos, donde los gobiernos regulaban y las empresas seguían políticas de forma estricta. Muchas de las medidas se centraban en el “lado de salida”; los residuos no se trataban de evitar, posteriormente las medidas para mitigar la contaminación se limitaban a principios como “el que contamina paga” [3, 4]. Se utilizaron estrategias como enviar los residuos hacia países menos ricos; la gestión de residuos aumentó su importancia y se regularon los vertederos y los incineradores. No existía una conciencia colectiva para disminuir los residuos producidos por la actividad industrial y por el sistema en su conjunto [5].

Desde 1976 se ha escrito sobre una economía que cierre el ciclo de vida de los productos [6]. Algunos autores atribuyen que el concepto de Economía Circular (abreviado en adelante como EC) fue acuñado desde los años 60’s [7]. Los vínculos globales a través de los medios como los periódicos, la radio y la televisión, fomentaban una conciencia social que interrelaciona los problemas locales de una comunidad con problemas globales. En esta época se introdujeron conceptos centrados en el pensamiento preventivo y el ciclo de vida de los materiales. Los movimientos ambientales permitieron tomar en cuenta pensamientos como las “3 R’s” (reducir, reutilizar y reciclar) y a la vez, se empiezan a lanzar cientos de publicaciones sobre reciclaje y gestión de residuos [3]. No obstante, la entrada de materia y salida de productos en esta época permanecen desligadas y sin conexión.

A inicios del siglo XXI, la tasa de reciclaje presentaba ya un aumento considerable, asimismo, por parte de la academia se incrementó el interés de la gestión y reducción de residuos y la recolección y separación de desechos [8].

Este documento busca describir y analizar las bases conceptuales de la economía circular, desde identificar sus escuelas de pensamiento, reconocer los principales actores que intervienen en el modelo y sus niveles de implementación.

Materiales y métodos

El presente trabajo tiene un enfoque cualitativo, a través de una investigación documental que implicó la revisión y análisis de artículos de alto impacto sobre el tema de Economía Circular, encontrados dentro de las bases de datos del portal Web of Science de Clarivate Analytics. Las palabras clave que se sometieron a búsqueda fueron “Circular Economy”, “Models” and “Sustainability”, se consideró únicamente a los artículos Open Access publicados en los años 2015 a 2019. Se prestó especial atención a los trabajos con mayor número de citas.

Resultados

La EC se ubica dentro del Desarrollo Sustentable y abarca tres objetivos base que se deben cumplir al mismo tiempo: calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social [9]. Al respecto se tiene un concepto de EC que engloba tales objetivos: “sistema económico que se basa en modelos de negocios que reemplaza el concepto de fin de vida con la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de procesos de producción/distribución y consumo de materiales que operan a nivel micro (productos, empresas y consumidores), meso (parques ecoindustriales), macro (ciudades, regiones) con el propósito de lograr un desarrollo sostenible. Lo que implica crear calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de generaciones actuales y futuras” [10, 11, 12].

Asimismo, la EC hace referencia a “un modelo económico basado en el principio de cerrar el ciclo de vida de los recursos de forma que se produzcan los bienes y servicios necesarios al tiempo que se reduce el consumo y el desperdicio de energía, agua y materias primas” [13]. Los primeros trabajos enfocados en cerrar ciclos de vida de los materiales fueron hechos por P. L. Simmonds (1814-1897), del siglo XIX, aunque también se puede remontar hasta la “Tableau Economique” de Quesnay (1758) [14]. La EC ha ganado popularidad desde fines de los años 70's [15]. Asimismo, busca ser una mejor alternativa al modelo de producción económico lineal actual (comprar, utilizar y tirar) que amenaza al ambiente con consecuencias en pérdida de biodiversidad, contaminación del suelo, aire y agua [16, 17, 18, 19].

La EC incorpora en sus principios en las 3 R's, los cuales dan las bases para crear distintas formas de pensamiento a través de: reducir o eliminar residuos y contaminación, equilibrar los flujos de recursos renovables (design out waste and pollution), optimizar los recursos en los ciclos técnicos y biológicos (keep materials and products in use) y regeneración de los recursos a partir de la creación de ciclos biológicos y técnicos (regenerative natural system) [20, 21, 22, 23, 24].

La EC se analiza desde tres escenarios:

1. El gobierno con implementación de políticas que van desde el nivel macro a micro (European Urban Knowledge Network [25]) mediante programas piloto e iniciativas para satisfacer la necesidad de cerrar el ciclo de vida de los materiales e introducir formalmente la EC. Destacan en este punto China, Japón, Reino Unido, Alemania, Holanda y Dinamarca [26, 27, 28, 29, 30].
2. La academia con actualización curricular, artículos, conferencias y estudios de caso.
3. Las asociaciones internacionales con informes, reportes y eventos [31, 32, 33].

Un caso representativo de asociaciones es la Fundación Ellen MacArthur, líder en EC a nivel mundial, creada en 2010. Cuenta con 85 empleados y una inversión de 8 695 235 libras al año. Entre sus socios globales están Google, Danone, H&M, Philips, Nike, Renault y Unilever con quienes explora el potencial de la EC como una fuente de creación de valor para la industria.

La implementación de la EC permite obtener beneficios al reducir el uso de recursos naturales, como son: 1) ahorro de 700 millones de dólares anuales en costos de material en la industria de bienes de consumo; 2) reducción del 48% de emisiones de dióxido de carbono para 2030; 3) reducción de 550 mil millones en el costo sanitario asociado al sector alimentario; 4) reducción del 47% del tráfico en ciudades de China; 5) oportunidad económica de 706 mil millones de dólares, entre otros [26].

Escuelas de pensamiento de la economía circular

El enfoque de EC evoluciona junto con el Desarrollo Sustentable. Su base conceptual se estructura a partir de elementos de distintas escuelas de pensamiento como son: Diseño Regenerativo (Regenerative Design), Economía del Rendimiento (Performance Economy), De Cuna a Cuna (Cradle to Cradle), Ecología Industrial (Industrial Ecology), Biomimesis (Biomimicry), Economía Azul (Blue Economy), Permaculture, Capitalismo Natural (Natural Capitalism), Metabolismo Industrial (Industrial Metabolism) y Simbiosis Industrial (Industrial Symbiosis) [34, 35, 26, 36].

1. *Diseño regenerativo (Regenerative Design)*. Éste tiene sus antecedentes desde la agricultura permanente desarrollada por David Holmgren [37]. Lyle [38] lo desarrolla a partir del trabajo de Holmgren y Mollison en Estados Unidos. Este diseño está enfocado

en procesos y de cómo estos propios procesos restauran, renuevan y reutilizan sus fuentes de energía y los recursos. Asimismo, sentó las bases para el marco de la EC, que ganó notoriedad gracias a McDonough quien fue estudiante de Lyle, Braungart y Stahel.

2. *Economía de rendimiento (Performance Economy)*. Stahel y Reday [6] notaron que una economía basada en bucles podía tener gran impacto en la creación de empleos aunado a un ahorro de recursos con un manejo controlado de los residuos. Sus principales objetivos son: 1) extender la vida útil de los productos, 2) producir objetos con una vida útil larga, 3) realizar reingeniería, restauración y rediseño de actividades y 4) prever los desechos.
3. *De la cuna a la cuna (Cradle To Cradle)*. Creado por William McDonough y Michael Braungart [39], se refiere a hacer que los ciclos de vida de los productos no terminen. Es decir, no crear más desechos y desperdicios y rehusar productos y recursos. Sus principios son: 1) eliminar el concepto de residuo, 2) utilizar energías renovables y 3) todo debe contribuir a la diversidad.
4. *Ecología industrial (Industrial Ecology)*. Consiste en un punto de vista holístico que permite estudiar los flujos de materia prima y energía dentro de un sistema industrial [40]. Se centra en las conexiones entre operadores dentro de procesos en un “ecosistema industrial”. Con este enfoque se pretende crear procesos en bucle en los que, como “Cradle to cradle”, los desechos sirvan de insumo [39]. También se enfoca en la restauración del capital natural y en que la sociedad se desarrolle de la mejor manera [41].
5. *Biomimesis (Biomimicry)*. Disciplina que estudia la forma en que la naturaleza resuelve diversos problemas para replicar estrategias y procesos para solucionar problemas de la sociedad. Fue creada por Janine Benyus y tiene los siguientes principios: 1) Modelos basados en la naturaleza, 2) Estandarización de medidas basadas en la naturaleza para evaluación de la sostenibilidad y 3) Aprender de la naturaleza [42].
6. *Economía azul (Blue Economy)*. Desarrollada por Gunter Pauli. Está basada en 21 principios y hace hincapié en que los problemas son resueltos por medio de un entorno local y de sus distintas características ecológicas y físicas. Se enfatiza que la gravedad puede ser la principal fuente de energía [43].
7. *Permaculture*. Se basa en un diseño en el cual los sistemas aprendan a razonar por ellos mismos, gracias a la utilización de algoritmos obtenidos de la naturaleza los cuales después son simulados [44].
8. *Capitalismo Natural (Natural Capitalism)*. Hace referencia a tomar a los recursos naturales como parte de nuestra empresa. Es decir, como capital y activos naturales, esto incluye desde los seres vivos hasta el aire, agua y suelo [45]. Paul Hawken, Lovins y Hunter Lovins [36] refieren una economía en la que los negocios y los intereses ambientales se superponen. Reconoce la relación existente entre la producción, el uso de capital natural y el valor agregado dado por el hombre. Se basa en las siguientes ideas: aumentar exponencialmente la productividad de los recursos naturales, cambiar a modelos y materiales siguiendo a la naturaleza, poner el “servicio y flujo” como principal modelo de negocio a seguir y reinvertir en capital natural.

Las anteriores escuelas se complementan y crean principios fundamentales para la EC como: a) diseño de residuos/reutilización [46,27], b) construir resiliencia a través de la diversidad [30], c) confiar en la energía de fuentes renovables [35, 27, 28, 30], d) pensar en sistemas [28] y 5) los residuos son alimentos/ valores compartidos -simbiosis- [26].

Modelos de negocio de la economía circular

Los modelos de negocios definen la estructura organizacional, su desarrollo y son un impulso para la innovación y transición hacia la EC [41]. El establecimiento de estos modelos implica destinar una gran cantidad de dinero, lo que puede limitar a la misma empresa el mejorar o cambiar su modelo actual [47]. El que una misma tecnología o innovación pase por el mismo modelo de negocio puede generar distintos resultados económicos dependiendo de la empresa, país, etc. [48]. De ahí la importancia de desarrollar un buen modelo de negocio que defina claramente la obtención de ingresos, el acceso al mercado y la obtención de valor y la gestión sustentable de los recursos de la empresa. Ya que por sí sola la innovación en los productos o tecnologías no garantizan el éxito del negocio.

Cambiar los modelos tradicionales a un modelo circular requiere un cambio radical de la estructura del negocio, así como de invertir dinero, lo que obliga al empresario a crear una nueva forma de percibir los negocios [50]. Entre los modelos de negocio que se ajusta a enfoques como cierre de ciclos y bucles en los recursos están:

1. *Modelo de acceso y rendimiento*, que provee la capacidad de satisfacer alguna necesidad sin ser propietario de los productos físicos [51, 52]. Por ejemplo, compartir el auto, arrendamiento de ropa, arrendamiento de celulares.
2. *Extender el valor del producto*, a través de utilizar el valor residual de los productos, desde el comienzo de la fabricación hasta llegar al consumidor y después de regreso a la fabricación o reestructuración entre distintas entidades comerciales [53]. Como es el caso de la industria de remanufacturado, empresas dedicadas a comprar artículos electrónicos y revenderlos, o iniciativas de reutilizar ropa.
3. *Modelo clásico de vida larga*, el cual se enfoca a entregar al cliente productos de larga duración, con apoyo de diseños de alta durabilidad y reparaciones [54, 55].
4. *Alentar suficiencia*; es decir, reducir de forma significativa el consumo del usuario mediante durabilidad, capacidad de actualización, servicio continuo por parte de la empresa, garantías largas, reparabilidad y enfoques no consumistas. Por ejemplo, la empresa Toyota o algún servicio de alta calidad premium como ESCOs [56, 57].
5. *Extender el valor del recurso*, a través de la explotación del valor residual de los recursos, recopilación y obtención de materiales o recursos que de otra manera se “desperdician” para convertirlos en nuevas formas de valor. Por ejemplo, los bancos de reciclaje [58].
6. *Simbiosis industrial*, es una solución orientada a procesos, relacionada con el uso de productos residuales de un proceso como materia prima para otro proceso, que se beneficia de la proximidad geográfica de las empresas [58, 59].

De acuerdo a la Fundación Ellen MacArthur [27], para que un modelo de negocio sea funcional se deben considerar la segmentación de los clientes, los recursos y actividades clave de la empresa, el valor potencial del producto o servicio, la cadena de suministro a través de los canales por donde se mueve el producto, relación adaptable y ágil con los clientes, fortalecer la cadena de valor a través de asociaciones nuevas o inesperadas, las erogaciones para implementar el modelo circular teniendo en cuenta el cómo reducir la volatilidad de los costos, la dependencia de recursos naturales finitos, tener planes para mitigar el riesgo y por último, los ingresos que se pudieran generar por otro tipo de valor ya sea humano, social o natural.

Niveles de implementación de la economía circular

La EC puede ser implementada a tres niveles:

Nivel micro

En este nivel están los círculos creados por la sociedad, en los cuales puede participar cualquier persona con pequeñas acciones que van desde el poner la basura en su lugar y reciclar, hasta rentar productos y convertir a un consumidor en usuario. Sin embargo, para que exista un impacto significativo, estas acciones se deben articular y formar círculos más grandes [60, 61]. La educación juega un papel importante, para desarrollar la responsabilidad del consumidor para usar productos más sustentables [24], así como crear habilidades en la innovación circular [46].

La adopción de modelos de EC a nivel micro genera beneficios que permiten acceder a servicios en lugar de adquirir un bien, por ejemplo, la renta de ropa [62]. Se estima que para el 2030 en la Unión Europea se aumentaría el ingreso en un 11% más que en la ruta de desarrollo actual. Los productos fabricados podrían durar más o ser reutilizables, lo que mejoraría los presupuestos y la calidad de vida [63, 64].

Los instrumentos funcionales para los consumidores ecológicos son sistemas específicos de información y etiquetado que cubren alimentos, productos no alimenticios y servicios; los cuales, se están desarrollando en todos los continentes [65].

Otra herramienta importante en la política es el consumo ecológico. Este impulsa la adopción de productos y servicios con un menor impacto en el ambiente y ha llegado a ser tan importante que solo en la Unión Europea, la contratación pública de productos ecológicos representó aproximadamente el 19,9% del PIB en 2009 [66].

La gestión de residuos es un subsector importante de la EC y crea nuevos roles de operadores y procesos como los “carroñeros” y “composteadores”. Es decir, empresas capaces de extraer recursos de los residuos a través de procesos con ayuda de tecnología innovadora [62].

Nivel Meso

El sector empresarial con el modelo de creación de valor actual desperdicia grandes cantidades de recursos. Ejemplo de esto es que en Europa el reciclaje de materiales y la energía basada en residuos logra capturar solo el 5% del valor original de la materia prima [26]. El uso del automóvil es aproximadamente de un 8%, lo cual demuestra que queda estacionado 92% del tiempo. En la industria alimenticia, 31% de los alimentos se desperdician a lo largo de la cadena de valor. El promedio en que las oficinas son usadas incluso en horario laboral es de 35 a 50 por ciento del tiempo [27, 45].

En la última década, las empresas muestran un mayor compromiso por parte de los reguladores para reducir y valorar las externalidades negativas. Desde el 2009 las leyes acerca el cambio climático han aumentado en 66%, es decir, de 300 a 500 leyes para el cambio climático y emisiones de CO₂ [67].

Los avances tecnológicos de la EC pueden crear ventanas de oportunidad enormes para la sociedad. En la actualidad las TIC`S y la industria se implementan a escala, lo cual permite que se creen enfoques comerciales de EC. Los avances permiten una colaboración e intercambio de información más rápida, más segura y eficiente; también proporciona un mejor seguimiento de los materiales, configuraciones de logística, uso de energías y uso de energías renovables [68].

La Fundación Ellen MacArthur estima para un escenario de la EC que, en algunos productos de vida mediana en la Unión Europea, la oportunidad anual de ahorro de costos por material neto asciende hasta los 630 mil millones de dólares. Tan solo el Reino Unido se podrían ahorrar 1,1 mil millones de dólares al año tan solo en costos de vertedero, además de poder proporcionar

2 GWh en valor de electricidad y proporcionar una reposición del suelo [27]. Para los bienes de consumo rápido, se especula un potencial de hasta 700 mil millones de dólares a nivel mundial [26].

La fundación SUN, McKinsey y Ellen MacArthur financiaron un estudio comparativo que es el más grande hasta la fecha. El estudio arroja el posible impacto de una transición del modelo lineal a un modelo circular de economía, con efectos positivos en la creación de empleos para la EC [63]. Lo cual, se debe a un aumento del gasto impulsado por precios bajos en todos los sectores y al gran rigor laboral de actividades de reciclaje de alta calidad y a la remanufactura de trabajos altamente calificados. Se crearían empleos en cada sector industrial, mediante desarrollo de logística inversa local, en pequeñas y medianas empresas, a través del emprendimiento e innovación, con el modelo de EC basada en servicios [69].

Estudios realizados en Dinamarca [26] apuntan que diez oportunidades de EC podrían liberarse. Es decir, para 2035 se crearían alrededor de 7 300 a 13 300 trabajos, en otras palabras, aumentaría el trabajo de 0,4 a 0,6% en comparación a un escenario con el modelo de económico lineal.

Un estímulo poderoso para mejorar la creatividad y creación de ideas es la aspiración de reemplazar productos basado en la economía lineal por productos que son circulares por diseño y crear redes de logística inversa por diseño. Una economía innovadora conlleva tasas más altas de desarrollo tecnológico, materiales mejorados, mano de obra y eficiencia energética, al igual que más oportunidades de ganancias para las empresas [46].

La EC puede dar como resultado una reducción al consumo de material primario, es decir, recursos primarios no renovables asociado a actividades extractivas. Esta reducción se estima en un 32% para el año 2030 y en un 53% para el 2050 [27].

Al año, la degradación de la tierra cuesta aproximadamente 40 mil millones de dólares, sin embargo, no se toman en cuenta el uso de fertilizantes, esto da como resultados mayores costos ocultos. Tampoco se toman en cuenta las consecuencias de la pérdida de biodiversidad. La productividad de la tierra y la recuperación de sus propiedades y valor serían posible si existiera menos desperdicio en la cadena de suministro de los alimentos y el regreso de nutrientes al suelo. La EC mueve bastante material biológico que vuelve al suelo gracias al compostaje, esto reduce el uso de fertilizantes. Sistematizar el uso de desechos orgánicos puede sustituir a los fertilizantes químicos. Si se implementa un enfoque de la EC en Europa para el sistema de alimentos, podría hacer que el uso de los fertilizantes sintéticos disminuya hasta un 80% para 2050. Este es el principio Regeneración en el trabajo [35].

Nivel Macro

Está bien documentado que el 75% del consumo de recursos naturales ocurre en las ciudades. Las ciudades producen el 50% de los residuos mundiales y el 60-80% de las emisiones de gases de efecto invernadero [70]. Se asumen que para el año 2050, la población que vive en las ciudades crecerá con 2 500 millones de personas más, por ende, se elevará la proporción de personas que vive en las ciudades en un 66% [70].

Para tener un desarrollo por EC en las ciudades, se necesita un trabajo integral de rediseño de cuatro sistemas: el sistema industrial, que podría darse con la eliminación gradual de empresas contaminantes en favor de actividades económicas claves relacionadas; sistemas de infraestructura que brinda servicios, como sistemas de transporte y comunicación, energía limpia, etc.; el marco cultural y sistema social [71, 72].

El concepto de eco-ciudades surge en Estados Unidos con el objetivo de rediseñar ciudades con un enfoque más ecológico [73]. Los japoneses crearon un programa para eco-ciudades desde 1997, al unir la urbanización con los centros industriales en proyectos simbióticos gracias a su aproximación geográfica [30]. Desde su adopción se han creado 26 eco-ciudades. Las cuales reciben subsidios para invertir en proyectos innovadores de reciclaje. Además, éstos generan más proyectos no subsidiados que son proporcionados al público y para beneficios privados. Ejemplos de eco-ciudades se pueden encontrar en Alemania, Suecia, Inglaterra y China.

Conclusiones y recomendaciones

Aunque la EC se encuentra en una implementación temprana, proporciona una visión para mejorar el actual modelo de economía lineal. El cierre de ciclos de vida de los productos permite generar un desarrollo regenerativo y por lo tanto un bienestar social y económico. Sin embargo, la EC requiere de un cambio del sistema productivo para tener un impacto global.

La EC y protección al ambiente pueden ser factores cruciales para orientar distintas políticas a la transición de nuevos modelos de producción y consumo. Países como China promueven la EC a través de políticas públicas, mientras que países de Europa lo hacen desde pequeños círculos que se multiplican y se integran creando grandes colectivos que ayudan con la reducción de residuos y uso de recursos. Asimismo, se suman a este trabajo organizaciones como la Fundación Ellen MacArthur junto con grandes empresas multinacionales como Google, Unilever, Renault, por mencionar a algunas.

De hecho, la Fundación Ellen MacArthur hace alusión de que los beneficios de la EC pueden ser enormes como reducción de desechos y preservación de recursos naturales, mientras que en un panorama perfecto, puede dar creación de empleos y un mejoramiento económico.

La EC implica la intervención de distintos niveles de la sociedad y de la integración de distintas herramientas en las que implica al sector productivo, del cual, se quiere que haga más con menos y que exista menos dependencia de los recursos no renovables.

Esto trae consigo un aumento de responsabilidad tanto de los productores como los usuarios finales del bien o servicios.

La Economía circular constituye una alternativa viable a los sistemas de producción que agotan los recursos naturales, contaminan y generan pobreza y desigualdad.

Referencias

- [1] Carter, N. "The Politics of the Environment: Ideas, Activism, Policy" UK: Cambridge University Press, 2001
- [2] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. The Limits to Growth. USA: MIT, 1972.
- [3] Gertsakis, J., & Lewis, H. "Sustainability and the waste management hierarchy." EcoRycle Victoria, 2008.
- [4] Miller, G. T., & Spoolman, S. E. Environmental science. Ed 14. USA: Cengage Learning, 2010.
- [5] Moyers, B. Global dumping ground: The international traffic in hazardous waste. Cambridge: The Lutterworth Press, 1993.
- [6] Stahel, W. R., & Reday, G. "The potential for substituting manpower for energy, report to the Commission of the European Communities," 1976.
- [7] Murray, A., Skene, K., Haynes, K., Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. "The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context." Journal of Business Ethics, 140, 369-380, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- [8] Bergsma, G. C., Vroonhof, J. T. W., Blom, M. J., & Odegard, I. Y. R. "Evaluatie Landelijk Afvalbeheerplan (LAP) 1 en 2". Netherlands: CE Delft, 2014.

- [9] Brundtland, G. H. "Report of the World Commission on environment and development: our common future.", 1987.
- [10] Elkington, J. "Cannibals with Forks: Triple Bottom Line of 21st Century Business" Oxford, United Kingdom: Capstone Publishing, 1997.
- [11] Fulton, S. C., De Silva, L., & Anton, D. "Twenty years after the rio earth summit: what is the agenda for the 2012 United Nations Conference on Sustainable Development? In American Society of International Law." Proceedings of the Annual Meeting (p. 91). Cambridge University Press, 2012.
- [12] Taylor, S. J. "A review of sustainable development principles: Centre for environmental studies." South Africa: University of Pretoria, 2016.
- [13] Garea, B., Torres, A., Pish, M., & Gómez, C. "Cambio Climático y Desarrollo Sostenible. Bases conceptuales para la enseñanza en Cuba." Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba: Editorial Educación Cubana, 2014.
- [14] Cooper, T. "Peter Lund Simmonds and the political ecology of 'waste utilization' in Victorian Britain." *Technology and Culture*, 52(1), 21, 2011.
- [15] Ellen MacArthur Foundation (EMF). "Towards the Circular Economy, 3(Isle of Wight)." 2014.
- [16] Jackson, T. *Prosperity without growth: Economics for a finite planet*. 1 ed, USA, Earthscan, 2009.
- [17] Meadows, D., & Randers, J. *The limits to growth: the 30-year update*. Routledge, 2012.
- [18] Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F. S. Lambin, E. F., & Nykvist, B. "A safe operating space for humanity: identifying and quantifying planetary boundaries that must not be transgressed could help prevent human activities from causing unacceptable environmental change, argue Johan Rockstrom and colleagues." *Nature*, 461, 472–476, 2009.
- [19] WWF. "Living Planet Report 2014: Summary." Gland, Switzerland, 2014.
- [20] Preston, F. "A global redesign? Shaping the circular economy". Chatham House, 2012.
- [21] Qin, R. "Industrial sustainability in China: Practice and prospects for eco-industrial development." *Journal of Environmental Management*, 83, 315–328, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.007>
- [22] Reh, L. "Process Engineering in circular economy." *Particology*, 11(2), 119–133, 2013 <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.11.001>
- [23] Sakr, D., Baas, L., El-haggar, S., & Huisingh, D. "Critical success and limiting factors for eco-industrial parks : global trends and Egyptian context." *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1158–1169, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.001>
- [24] Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., & Yu, X. "A review of the circular economy in China : moving from rhetoric to implementation." *Journal of Cleaner Production*, 42, 215–227, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>
- [25] European Urban Knowledge Network (EUKN). "The Circular City. Lessons From Europe". Factsheet for Policy Lab Netherlands. The Netherlands, 2015.
- [26] Ellen MacArthur Foundation (EMF). "Delivering the circular economy: A toolkit for policymakers." 2015.
- [27] Ellen MacArthur Foundation (EMF). "Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe." 2015.
- [28] Joustra, D. J., de Jong, E., & Engelaer, F. *Guided Choices: Towards a Circular Business Model*, France: North-West Europe, Interreg IVB, 2013.
- [29] Osterwalder, A., & Pigneur, Y. *Business model Generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. USA: John Wiley & Sons, 2010.
- [30] Van Renswoude, K., ten Wolde, A., & Joustra, D. J. *Circular Business Models—Part 1: An introduction to IMSA's circular business model scan*. Amsterdam, The Netherlands: IMSA, 2015.
- [31] OECD (2016). *Forum 2016 Issues: International Collaboratio*. Recuperado de: <https://www.oecd.org/forum/issues/forum-2016-issues-international-collaboration.htm>
- [32] United Nations Environment Programme (UNEP). "Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth." *UNEP/Earthprint*, 2011.
- [33] World Economic Forum (WEF). "Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains" Geneva, 2014.
- [34] Ayres, R. U. "Industrial Metabolism: Theory and Policy." In A. BR & R. DJ (Eds.), *Greening of Industrial Ecosystems*, pp 23-37, 1994.

- [35] Ellen Macarthur Foundation (EMF). "The Circular Model e Brief History and School of Thought", 2013.
- [36] Lovins, A. B., Lovins, L. H., & Hawken, P. (1999). "A road map for natural capitalism." *Harvard Business Review*, Jul-Ago 2007.
- [37] Holmgren, D. *Permaculture: Principles & pathways beyond sustainability*. Holmgren Design Services, 1978.
- [38] Lyle, J. T. *Regenerative design for sustainable development*. John Wiley & Sons, USA, 1996.
- [39] McDonough, W., & Braungart, M. *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. New York: North Point Press, Farrar, 2002.
- [40] Linton, J. D., & Jayaraman, V. "A framework for identifying differences and similarities in the managerial competencies associated with different modes of product life extension." *International Journal of Production Research*, 43(9), 1807–1829, 2005.
- [41] Magretta, J. "Why business models matter." *Harvard Business Review*, 80, 86–92, 2002.
- [42] Benyus, M. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York: Morrow, 1997.
- [43] Pauli, G. A. *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Paradigm publications, 2010.
- [44] Mollison, B. and Holmgren, D. *Permaculture one: A Perennial Agriculture for Human Settlements*. USA: Intl Tree Corps, 1990.
- [45] Mathews, J. A. "Naturalizing capitalism: The next Great Transformation." *Futures*, 43(8), 868–879, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.06.011>
- [46] Ellen MacArthur Foundation (EMF). "Towards the Circular Economy. Opportunities for the Consumer Goods Sector." 2013.
- [47] Bettis, R. A., & Prahalad, C. K. "The dominant logic: Retrospective and extension." *Strategic Management Journal*, vol. 16(1), pp 5–14. 1995.
- [48] Chesbrough, H. "Business Model Innovation: Opportunities and Barriers" *Long Range Planning*, 43(2–3), 354–363, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.010>
- [49] Teece, D. J. *Business models, business strategy and innovation*. *Long Range Planning*, 43(2–3), 172–194, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.003>
- [50] Lofthouse, V., & Bhamra, T. *Design for Sustainability: A Practical Approach*. UK: Gower Publishing Ltd, 2007.
- [51] Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., & Hollander, M. Den. "Products that go round: exploring product life extension through design", *Journal of Cleaner Production*, vol. 69, pp 10–16, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.028>
- [52] Tukker, A. "EIGHT TYPES OF PRODUCT – SERVICE SYSTEM: EIGHT WAYS TO SUSTAINABILITY? EXPERIENCES FROM SUSPRONET" *Business Strategy the Environment* 13, 246–260, 2004.
- [53] Wells, P., Seitz, M., & Seitz, M. "Business models and closed-loop supply chains: a typology." *Supply Chain Management*, 10(4), 249-251, 2006 <https://doi.org/10.1108/13598540510612712>
- [54] Bakker, C., den Hollander, M., Van Hinte, E., & Zlijstra, Y. "Products that last: Product design for circular business models.", TU Delft Library, 2014.
- [55] Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. "A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes." *Journal of Cleaner Production*, 65, 42–56, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
- [56] Bocken, N. M. P., & Short, S. W. "Environmental Innovation and Societal Transitions Towards a sufficiency-driven business model: Experiences and opportunities." *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 18, 41–61, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.010>
- [57] Evans, S., Gregory, M., Ryan, C., Bergendahl, M. N., & Tan, A. "Towards a sustainable industrial system: With recommendations for education, research, industry and policy." University of Cambridge, Institute for Manufacturing, 2009.
- [58] Ayres, R. U., & Simonis, U. "Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development", *Ecological Economics*, Vol. 17, pp 187-188, 1994.
- [59] Chertow, M. R. "Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy." *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 313-337
- [60] Prendeville, S., Sanders, C., Sherry, J., & Costa, F. "Circular economy: is it enough." *EcoDesign Centre*, Wales, 21, 2014.

- [61] Zhang, B., Yang, S., & Bi, J. "Enterprises' willingness to adopt/develop cleaner production technologies: an empirical study in Changsh", China. *Journal of Cleaner Production*, 40, 62–70, 2013.
- [62] Noronha, J. *Scavengers, and decomposers in an industrial park system: a case study of Burnside Industrial Park*. Canada: Dalhousie University, 1999.
- [63] Ellen MacArthur Foundation (EMF). "Towards the circular economy, economic and business rationale for an accelerated transition." Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK. 2015.
- [64] Timmermans, F., Katainen, J., Vella, K., & Bieńkowska, E. "Weg mit der Wegwerfmentalität". *Zeit Online Vom*, 28, 2015.
- [65] Environmental Protection Agency. "Environmental labelling issues, policies and practices worldwide", 1998.
- [66] Renda, A., Pelkmans, J., Egenhofer, C., Schrefler, L., Luchetta, G., Selçuki, C., & Zirnelt, A. C. "The uptake of green public procurement in the EU27. Study Prepared for DG Environment, European Commission, CEPS in Collaboration with the College of Europe, Brussels", 2012.
- [67] Mondiale, B. E. "Carbon pricing watch 2015, Advance brief from the state and trends of carbon pricing 2015 report" World Bank Group and Ecofys, Washington DC, 2015.
- [68] European Environmental Agency (EEA). "Overview of the use of landfill taxes in Europe." 2012.
- [69] Webster, K. "The circular economy: A wealth of flows." Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2017.
- [70] United Nations (UN). "World urbanization prospects. World Urbanization Prospects: Highlights" 2014.
- [71] Ness, D. "Sustainable urban infrastructure in China: Towards a Factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure systems." *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(4), 288–301, .2008
- [72] Zhijun, F., & Nailing, Æ. Y. "Putting a circular economy into practice in China", *Sustainability Science*, 2, 95–101, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0018-1>
- [73] Roseland, M. "Dimensions of the eco-city." *Cities*, 14(4), 197–202, 1997.