



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Abril – Junio 2026
Volumen 39 N° 2
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melICA

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigadores Científicos

DOAJ

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director de revista
Instituto Tecnológico de Costa Rica

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

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

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

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta

<https://www.pexels.com>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 39-2. Abril-Junio, 2026
- Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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



Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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

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

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

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

Publicación y directorio en catálogos

 **redalyc.org** UAEM

 **SciELO**

 **latindex**

 **melICA**

 **Dialnet**

 **DOAJ** DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Estimación de caudales en cuencas anidadas mediante regionalización hidrológica: caso de estudio en los Ríos Agua Caliente y Retes Flow estimation in nested basins through hydrologic regionalization: case study of the Agua Caliente and Retes Rivers <i>Fernando Watson-Hernández, Valeria Serrano-Núñez, Isabel Guzmán-Arias</i>	3
Caracterización de microorganismos de importancia médica mediante espectroscopía Raman Characterization of microorganisms of medical importance by Raman spectroscopy <i>Esteban Solís-Campos, Laura Rojas-Rojas, Erick Hernández-Carvajal, Ernesto Montero-Zeledón, Dionisio Gutiérrez-Fallas</i>	20
Fitohormonas y su impacto en la adaptación de las plantas al estrés salino: un artículo de revisión Phytohormones and their impact on plant adaptation to salt stress: a review article <i>Kharen Liliana Marengo-Cardona, Sara Lucia Romano-Peréz, Jovanna Acero-Godoy</i>	37
Aprovechamiento de los tallos de caña india (<i>Dracaena fragans</i>) como sustrato para la producción de tomate en hidroponía Use of chopped stems of <i>Dracaena fragans</i> as a substrate for tomato production in hydroponics <i>Rubén Calderón-Cerdas, José María Alvarado-Vargas, Rooel Campos-Rodríguez</i>	54
Suplementación nutricional del tomate con el alga marina (<i>Ascophyllum nodosum</i>) Nutritional supplementation of tomato with the marine algae (<i>Ascophyllum nodosum</i>) <i>Daniela Blanch-Bermúdez, Rubén Calderón-Cerdas</i>	63
Evaluación de un conjunto de unidades de toma de decisiones brasileñas mediante Análisis Envolvente de Datos Evaluation of a set of brazilian decision-making units using Data Envelopment Analysis <i>Pedro Vieira Souza Santos, Lucas di Paula Gama dos Santos, Letícia de Souza Lima</i>	74
Efecto sobre rendimiento cosechado de diferentes forrajes y labor de corte: estudio de caso en Oreamuno, Cartago Effect on harvested yield of different forages and cutting work: case study in Oreamuno, Cartago <i>Javier Paniagua-Molina, Wilson Muñoz-Valerio, Johanna Solórzano-Thompson</i>	85

Módulos dinámicos de <i>Pinus pseudostrabus</i> y de tableros de madera Dynamic modules of <i>Pinus pseudostrabus</i> and wood panels <i>Javier Ramón Sotomayor-Castellanos</i>	101
Control de calidad del concreto hidráulico en edades tempranas, utilizando el ensayo ultrasónico Quality control of hydraulic concrete at early ages using ultrasonic testing <i>Luis Carlos Calvo-Navarro</i>	111
El frijol nativo de Matambú, Guanacaste, Costa Rica: una mirada sociocultural Common bean landraces in Matambú, Guanacaste, Costa Rica: a sociocultural perspective <i>Susana Campo-Molina, Vania Solano-Laclé, José Eladio Monge-Pérez</i>	123
Ransomware en Costa Rica: Lecciones aprendidas en instituciones públicas desde la ingeniería de sistemas Ransomware in Costa Rica: Lessons Learned in Public Institutions from a Systems Engineering Perspective <i>Andy Alberto Carrillo-Espinoza</i>	140

Estimación de caudales en cuencas anidadas mediante regionalización hidrológica: caso de estudio en los Ríos Agua Caliente y Retes

Flow estimation in nested basins through hydrologic regionalization: case study of the Agua Caliente and Retes Rivers

Fernando Watson-Hernández¹, Valeria Serrano-Núñez², Isabel Guzmán-Arias³

Fecha de recepción: 22 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 4 de setiembre, 2025

Watson-Hernández, F; Serrano-Núñez, V; Guzmán-Arias, I. Estimación de caudales en cuencas anidadas mediante regionalización hidrológica: caso de estudio en los Ríos Agua Caliente y Retes. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 3-19.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7961>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 fwatson@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 vserrano@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3708-9323>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 iguzman@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5553-3977>

Palabras clave

Uso del suelo; oferta hídrica; modelación hidrológica; regionalización; incertidumbre.

Resumen

La estimación de caudales en regiones con escasez de datos hidrometeorológicos, requiere técnicas especiales para este tipo de casos, una de ellas es la regionalización hidrológica basada en la transferencia de parámetros entre cuencas hidrográficas. El presente estudio implementó el modelo hidrológico HBV Light para estimar los caudales en la subcuenca del río Retes, ubicada en la zona norte de Cartago, Costa Rica, mediante la transferencia y aplicación de parámetros previamente calibrados en la subcuenca del río Agua Caliente. El análisis estadístico de los resultados evidencia un desempeño satisfactorio del modelo, reflejado en un coeficiente de determinación (R^2) de 0,865 y un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,76 durante el período de estiaje (enero-abril), lo que evidencia la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente la dinámica hidrológica en cuencas anidadas. Adicionalmente, se verificó que parámetros como la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (FC), la fracción del almacenamiento máximo (LP) y el control de distribución del agua (BETA) son congruentes con estudios previos en coberturas similares. Si bien los resultados obtenidos en el periodo lluvioso presentaron una disminución en su precisión, el estudio demuestra que una calibración cuidadosa y la regionalización basada en características físicas y climáticas permiten obtener estimaciones fiables de caudales. Este enfoque metodológico representa una contribución para optimizar la gestión de recursos hídricos en ecosistemas agrícolas particularmente vulnerables a la variabilidad y el cambio climático.

Keywords

Land use; water availability; hydrological modeling; regionalization; uncertainty.

Abstract

Estimating flow rates in regions with a scarcity of hydrometeorological data requires special techniques for this type of case, one of which is hydrological regionalization based on the transfer of parameters between river basins. The present study implemented the HBV Light hydrologic model to estimate flows in the Retes River sub-basin, located in the northern area of Cartago, Costa Rica, by transferring and applying parameters previously calibrated in the Agua Caliente River sub-basin. The statistical analysis of the results demonstrates the model's satisfactory performance, as evidenced by a coefficient of determination (R^2) of 0.865 and a Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE) of 0.76 during the dry season (January-April). This substantiates the model's aptitude in accurately replicating the hydrological dynamics within nested watersheds. Furthermore, it was ascertained that parameters such as soil water storage capacity (FC), maximum storage fraction (LP) and water distribution control (BETA) are congruent with those observed in previous studies conducted on analogous coverages. Despite the observed decline in accuracy during the rainy season, the study demonstrates that meticulous calibration and regionalisation based on physical and climatic characteristics facilitate the acquisition of reliable flow estimates. This methodological approach constitutes a contribution to the optimisation of water resource management in agricultural ecosystems, which are particularly vulnerable to climate variability and change. For the estimation of flow in regions with scarce hydrometeorological data, hydrologic regionalization based on parameter transfer between watersheds is a key methodology. The present study implemented the HBV

Light hydrologic model to estimate flows in the Retes River sub-basin, located in the northern area of Cartago, Costa Rica, by transferring and applying parameters previously calibrated in the Agua Caliente River sub-basin.

Introducción

La zona norte de la provincia de Cartago, ubicada en el Valle Central de Costa Rica, se caracteriza por su intensiva producción de hortalizas tales como cebolla, remolacha, zanahoria, papa, entre otras, alcanzando un 80% del total de la producción nacional y constituye la principal actividad socioeconómica de la población concentrada en los sectores circundantes. El aporte de la producción agrícola de esta zona, al abastecimiento de alimentos al país, es de gran relevancia, no obstante, el uso del recurso hídrico para este fin es limitado, debido a las condiciones naturales de esa región y a las normas legales. El área de estudio presenta un régimen climático particular: mientras el sector oriental es influenciado por los vientos alisios y frentes fríos provenientes del Caribe, el sector occidental experimenta condiciones más cálidas y húmedas bajo la influencia del Pacífico. Esta variabilidad genera que el Valle Oriental, donde se ubica el estudio, sea la segunda región más seca del país después del Pacífico Norte. La combinación de una prolongada época seca y un bajo régimen de precipitación incrementa la vulnerabilidad hídrica, afectando directamente la sostenibilidad agrícola.

La escasez de agua durante la época seca, junto con el crecimiento demográfico y el acceso restringido al agua de riego debido a la concesión total de los caudales, limitan la capacidad de los productores para ampliar áreas de cultivo o realizar múltiples cosechas anuales. Además, la creciente variabilidad climática complica la predicción de la transición entre épocas secas y lluviosas, impactando la planificación agrícola. Esta situación plantea la necesidad urgente de fortalecer la gestión del recurso hídrico mediante la incorporación de herramientas técnicas que permitan una distribución más eficiente y equitativa del agua disponible, basada en información precisa y coordinada a nivel interinstitucional. Actualmente, aunque la Dirección de Agua del MINAE tiene la autoridad para intervenir en situaciones de escasez según el artículo 140 de la Ley de Aguas, las herramientas para proyectar caudales a partir de pronósticos climáticos siguen siendo limitadas. Si bien el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) elaboran estimaciones estacionales de precipitación y temperatura, no existen modelos hidrológicos calibrados y validados que permitan traducir estas proyecciones en caudales útiles para la toma de decisiones a mediano y largo plazo. En diversos contextos, la regionalización de parámetros hidrológicos ha surgido como una estrategia eficaz para extender la aplicabilidad de modelos en áreas con escasez de datos. En el contexto mundial, existen experiencias de aplicación interesantes, Mizukami et al. [12], [13] aplicaron esta técnica en 531 cuencas de Estados Unidos utilizando el modelo VIC, logrando resultados satisfactorios en zonas con alta variabilidad estacional y diferentes usos de suelo. De manera complementaria, Beck et al. [3] realizaron una regionalización a escala global con el modelo PCR-GLOBWB, incluyendo cuencas agrícolas y forestales de Europa Central, donde observaron la influencia significativa del almacenamiento de agua en suelos. Razavi et al. [17] exploraron esquemas de clasificación de cuencas en Ontario, Canadá, utilizando métodos de análisis no lineales para la transferencia de parámetros hidrológicos, obteniendo valores del coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) entre 0,58 y 0,79, y un coeficiente de determinación (R^2) entre 0,65 y 0,84, evidenciando una adecuada generalización de los parámetros regionalizados. En China, Song et al. [20] emplearon técnicas de Gradient Boosting Machine en cuencas monzónicas, alcanzando un NSE medio de 0,64 en escala diaria y 0,84 en escala mensual. En Europa, Hundecha y Bárdossy [9], regionalizaron parámetros del modelo HBV en diversas condiciones climáticas, incrementando la robustez de las predicciones hidrológicas bajo variados escenarios hidroclimáticos. En Estados Unidos, Pool et al. [16] (utilizaron el conjunto de datos

CAMELS para mejorar la regionalización del modelo HBV-Light mediante un número reducido de observaciones de caudal, obteniendo NSE promedio entre 0,45 y 0,60, y un coeficiente de eficiencia de Kling Gupta (KGE) entre 0,55 y 0,70. De forma paralela Addor et al. [1] aplicaron Random Forest para la clasificación espacial de firmas hidrológicas, logrando un coeficiente de determinación (R^2) entre 0,29 y 0,92 dependiendo del tipo de variable evaluada.

Estos estudios resaltan que, aun bajo condiciones climáticas, topográficas y de cobertura terrestre diversas, es posible lograr regionalizaciones exitosas mediante la calibración cuidadosa y la selección adecuada de variables predictoras. En este caso, la extrapolación de los enfoques mencionados a la región de Cartago podría representar una oportunidad para fortalecer la gestión hídrica local a través de modelos hidrológicos calibrados y adaptados a las particularidades de la zona, de ahí el objetivo de estimar caudales en la subcuenca del río Retes mediante una técnica regionalización hidrológica, en donde la cuenca del río Agua Caliente se utilizará para la calibración y obtención de parámetros utilizando el modelo HBV-light.

Materiales y métodos

Este estudio integra investigación y extensión para la solución de un problema real de ingeniería, la fase de investigación aplicada abarca un enfoque cuantitativo que permite desarrollar una herramienta de estimación de caudales para los puntos de captación de agua para riego de hortalizas y una fase de extensión hacia grupos de productores organizados llamados Sociedades de Usuarios de Agua (SUA) en la zona norte de Cartago, Costa Rica, quienes enfrentan en sus sistemas de producción las condiciones previamente descritas. La metodología se divide en cuatro etapas principales: [1] análisis de variables hidrometeorológicas, [2] caracterización morfológica de la cuenca, [3] modelación hidrológica y [4] devolución participativa de resultados.

Área de estudio

El área de estudio comprende la subcuenca del río Retes y el río Agua Caliente. Estas subcuencas se localizan en la zona norte de Cartago, una región caracterizada por una intensa actividad agrícola y ganadera, así como por la presencia de áreas protegidas asociadas al volcán Irazú. La subcuenca del río Agua Caliente se extiende hasta la estación hidrométrica ubicada en Puente Negro, en el sector de Orosí, mientras que la subcuenca del río Retes se ubica en zonas de mayor elevación, con cobertura predominantemente forestal y vegetal. En la Figura 1 se muestra la ubicación del área de estudio.

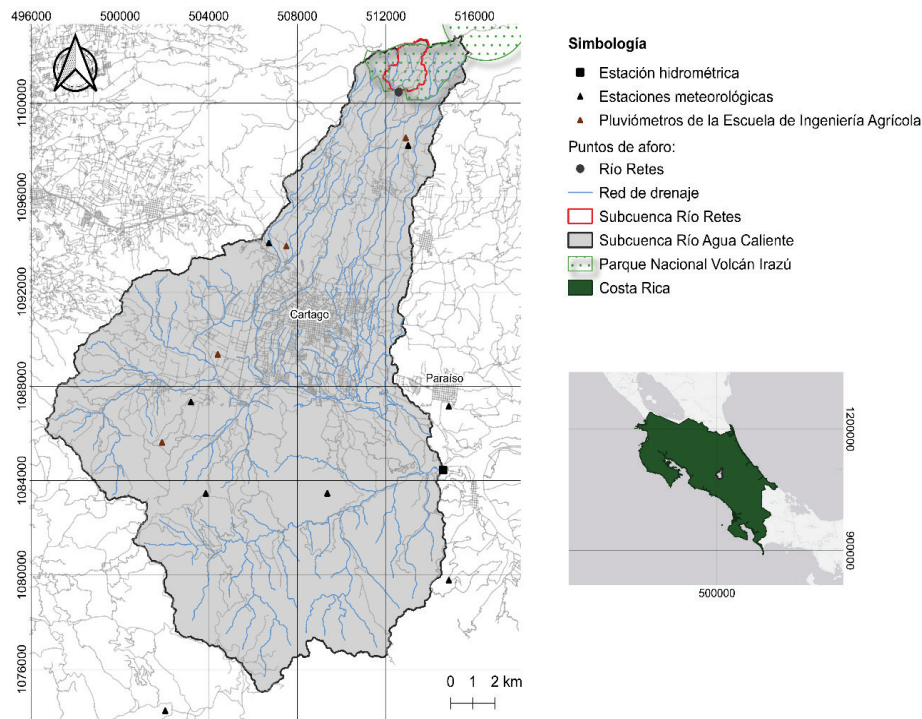


Figura 1: Ubicación del área de estudio del proyecto.

Análisis de variables hidrometeorológicas

En esta etapa, se recopilieron datos hidrometeorológicos históricos de las estaciones ubicadas dentro y en las cercanías del área de estudio. Las instituciones proveedoras de datos incluyeron el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Las variables solicitadas incluyeron precipitación acumulada, radiación solar, temperaturas máximas, mínima y promedio, y caudal observado, todas con una frecuencia diaria. Se seleccionaron estaciones con menos del 25% de datos faltantes, y los vacíos se completaron mediante regresiones multivariantes entre estaciones con alta correlación. En el Cuadro 1 se presentan las estaciones meteorológicas e hidrométricas utilizadas en el análisis.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas e hidrométricas.

Número	Nombre	Entidad	Coordenadas CRTM05	
			X	Y
73011	Sanatorio Durán	ICE	513005,336	1098217,183
73018	Linda Vista, El Guarco	IMN	503199,144	1087342,403
73029	El Llano	ICE	514840,295	1079786,605
73041	La Cangreja	ICE	503869,357	1083470,054
73042	Muñeco	ICE	509354,089	1083471,036
73104	Concavas	ICE	514837,333	1087159,078
73129	Recope, Ochomogo	IMN	506719,636	1094077,281
88018	El Jardín	ICE	502041,639	1074254,348
730945	Puente Negro	ICE	514581,714	1084452,966

Caracterización morfológica de la cuenca

Para la caracterización morfológica, se utilizó un modelo de elevación digital (MED) ALOS PALSAR, descargado a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE). Este modelo se procesó en el sistema de información geográfica (SIG) QGIS para corregir depresiones superficiales y delimitar la subcuenca de estudio. La subcuenca del río Agua Caliente se subdividió en doce zonas de elevación, mientras que la subcuenca del río Retes se delimitó a partir de los puntos de aforo. Además, se realizó una clasificación semisupervisada del uso del suelo utilizando imágenes Sentinel-2, identificando tres clases principales: cobertura forestal, vegetación no forestal y áreas sin vegetación. La precisión de la clasificación se evaluó mediante el coeficiente kappa de Cohen.

Modelación hidrológica

Se empleó el modelo hidrológico Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV), un modelo conceptual semidistribuido desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia, para simular la respuesta hidrológica de las cuencas. Se utilizó una metodología de regionalización basada en la transferencia de parámetros desde la cuenca del río Agua Caliente (cuenca donante, con un registro histórico de 30 años) hacia la cuenca del río Retes (cuenca receptora, con registro limitado de 1.5 años), con el fin de estimar caudales en esta última bajo un enfoque de cuenca no aforada.

El proceso inició en la cuenca del río Agua Caliente; los datos de entrada incluyeron series diarias de precipitación, temperatura y caudal, así como promedios mensuales de temperatura y evapotranspiración. La calibración del modelo se realizó mediante el método de Monte Carlo con 2.000.000 de iteraciones, evaluando el desempeño a través de funciones objetivo como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Posteriormente, el modelo calibrado se validó utilizando un conjunto de datos independiente correspondiente a los últimos cinco años de la serie histórica. Las ecuaciones de estas funciones objetivo se presentan a continuación (Cuadro 2).

Cuadro 2. Funciones objetivo utilizados para la calibración del modelo hidrológico.

Función objetivo	Ecuación	Valor por "ajuste perfecto"
Eficiencia (NSE - Nash-Sutcliffe Efficiency) (<i>Reff</i>)	$Reff = 1 - \frac{\sum(Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$	1
Porcentaje de sesgo (<i>PBIAS</i>)	$PBIAS = 100 \cdot \frac{\sum(Q_{s_i} - Q_{o_i})}{\sum Q_{o_i}} \quad (3)$	0%
Raíz del error cuadrático medio (<i>RMSE</i>)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2} \quad (4)$	0
Error absoluto medio (<i>MAE</i>)	$MAE = \frac{1}{n} \sum Q_{s_i} - Q_{o_i} \quad (5)$	0
Coefficiente de determinación (R^2)	$R^2 = \left(\frac{\sum(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)(Q_{s_i} - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2 \sum(Q_{s_i} - \bar{Q}_s)^2}} \right)^2 \quad (6)$	1
Error cuadrático medio (<i>MSE</i>)	$MSE = \frac{1}{n} \sum (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2 \quad (7)$	0

Nota. Donde: Q_{o_i} son los caudales observados; Q_{s_i} son los caudales simulados; \bar{Q}_o es el valor promedio de los caudales observados; \bar{Q}_s es el caudal promedio de los caudales simulados; n es el número total de observaciones.

Para la subcuenca del río Retes, se transfirieron los 300 conjuntos de parámetros de mejor desempeño identificados en la cuenca donante, conservando la estructura de zonas de elevación y las reglas de parametrización física. El modelo fue alimentado con la serie meteorológica local disponible (1,5 años), estableciendo un período de calentamiento (warm-up) de seis meses para estabilizar las condiciones iniciales de almacenamiento. Finalmente, la idoneidad del modelo se evaluó contrastando el registro de caudales observados frente a la envolvente de incertidumbre generada por las 300 simulaciones.

Después de desarrollar el componente de investigación aplicada para resolver un problema específico de la gestión del recurso hídrico en la zona norte de Cartago (Figura 1), se incorporó el componente participativo mediante la devolución de resultados y la capacitación de los actores locales.

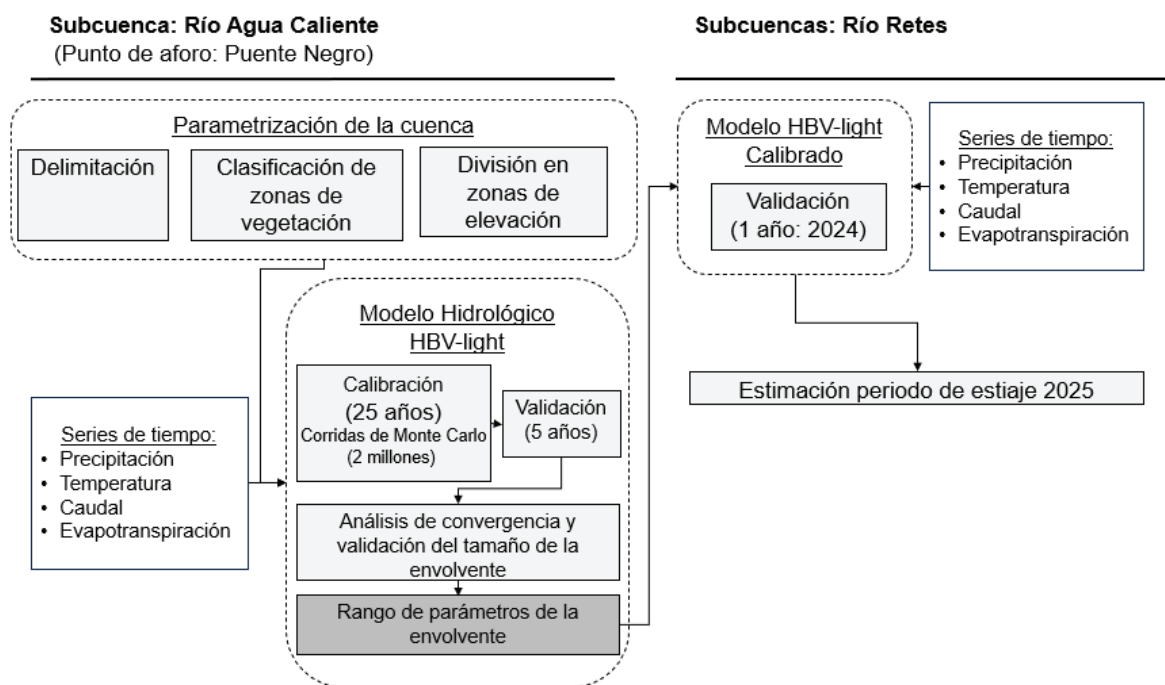


Figura 2. Esquema metodológico del estudio.

Resultados

Análisis de variables hidrometeorológicas

El régimen de lluvias de la subcuenca del río Agua Caliente presenta una precipitación promedio anual de 4,98 mm/día durante el periodo de tiempo analizado, con una diaria máxima de 91,75 mm el 3 de noviembre del 2010. La temperatura media anual es de 18,25°C, en un rango de 12,74°C y 28,0°C.

En el periodo de estudio del proyecto, el pluviómetro presentó la mayor concentración de sus registros de precipitación en los meses de septiembre y octubre, con valores máximos diarios que alcanzaron los 55 mm (29/10/2024), mientras que se observan períodos de déficit hídrico notables, particularmente en enero de 2024, esto demuestra una clara diferenciación entre las épocas lluviosa y seca. La temperatura media es de aproximadamente 15°C, con un registro máximo de 18,95°C (11/02/2024) y mínimo de 11,91°C (13/02/2024). Y la evapotranspiración

diaria se observa que a escala de la subcuenca del río Agua Caliente se presentan consistentemente valores más elevados a lo largo del año, en un rango de 1,87 mm/día (enero) y 2,52 mm/día (mayo), mientras que las mediciones del pluviómetro en la zona norte muestran un rango más estrecho entre 1,72 mm/día (enero) y 2,17 mm/día (mayo). Ambas variables presentan un comportamiento similar, con máximos durante el período mayo-junio y mínimos en diciembre-enero.

Caracterización morfológica de la cuenca

La cobertura del suelo en la subcuenca del río Agua Caliente se distribuye en: forestal, vegetación no forestal, y áreas sin vegetación. La cobertura forestal es la predominante, con altitudes medias – altas. Las áreas sin vegetación se distribuyen principalmente en la ciudad del centro de Cartago, en los distritos Oriental y Occidental del cantón. Cabe agregar que la clasificación semisupervisada en GEE presentó un coeficiente kappa de 0,869, la cual indica una clasificación muy buena.

La topografía de la subcuenca presenta una distribución gradual y variada a lo largo del territorio. La mayor parte de la subcuenca se encuentra entre los 1250 y 1900 m.s.n.m. y en las partes más altas (1900-3425 m.s.n.m.), la topografía es mucho más pronunciada. La subcuenca del río Retes se localiza en las zonas de mayor elevación y presentan una cobertura predominantemente forestal y vegetal, con aproximadamente un 99,93% de su área total cubierta por estas dos categorías.

Las partes de menor elevación (1076 - 1100 m.s.n.m.) tienen una proporción baja de cobertura forestal (0,07%) y vegetación (0,05%), mientras que en las elevaciones medias y altas (entre 1250 y 1670 m.s.n.m.) se observan incrementos en las coberturas forestales y, en áreas más elevadas (por encima de 2700 m.s.n.m.), la cobertura forestal disminuye significativamente a la vez que, las zonas sin vegetación incrementan.

En cuanto al análisis morfológico de la subcuenca del río Agua Caliente (Cuadro 4), esta se caracteriza por ser una cuenca relativamente alargada y de una forma moderadamente elíptica de la cuenca, con un coeficiente de compacidad ($K_c = 2,02$).

Modelación hidrológica

Los resultados de la calibración del modelo HBV light, obtenidos a partir de las 300 mejores simulaciones de un total de 2,000,000, evidencian un buen desempeño, con errores controlados y una capacidad adecuada para reproducir los caudales observados (Figura 3).

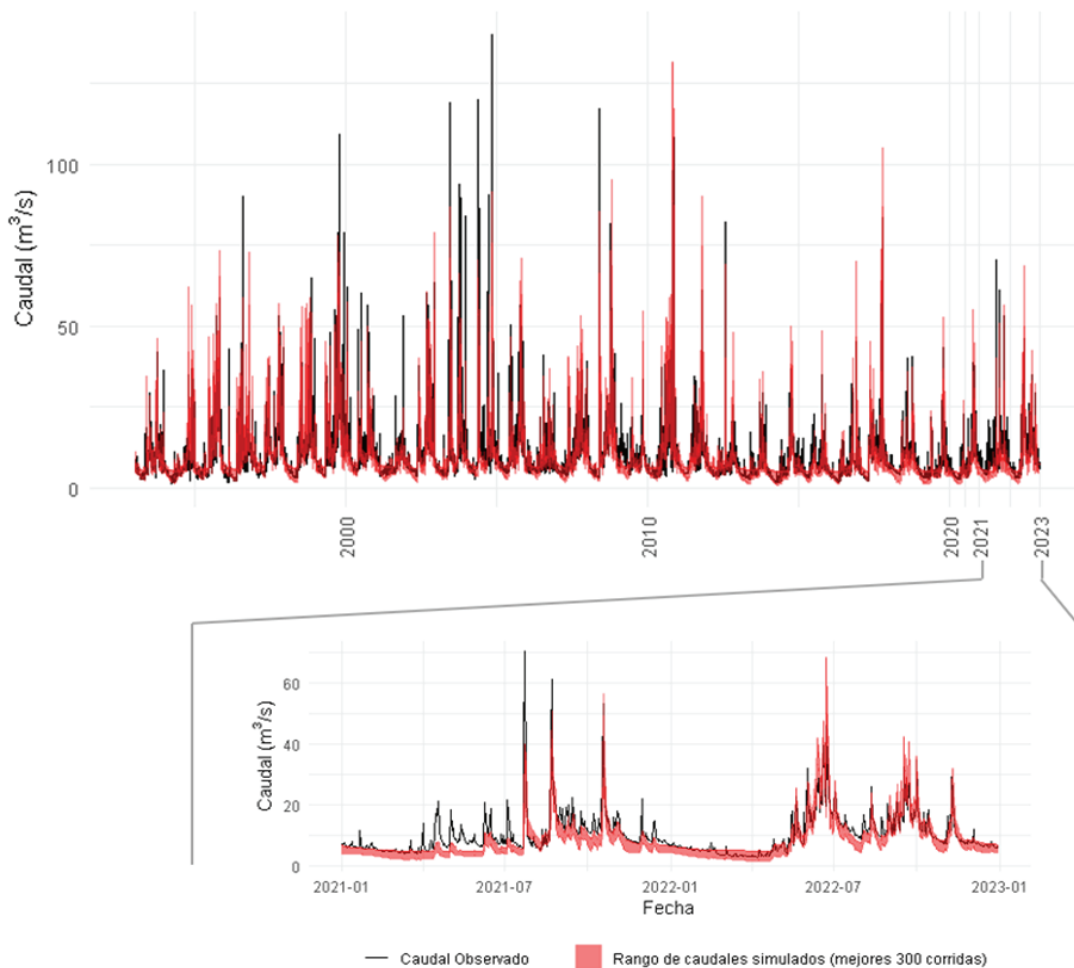


Figura 3: Caudal observado y rango de caudales simulados para la cuenca del río Agua Caliente.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) presenta un rango de 0,6965 a 0,7126, con una media de 0,7004, lo que indica que el modelo explica entre el 69,65% y el 71,26% de la variabilidad observada en los caudales. El porcentaje de sesgo (PBIAS) oscila entre -5,6% y 6,1%, con una media de -1,271%, reflejando una ligera tendencia a subestimar los caudales, aunque dentro de un margen aceptable. El coeficiente de determinación (R^2) muestra valores entre 0,7018 y 0,7374, con una media de 0,7199, confirmando que el modelo explica una proporción significativa de la variabilidad observada en los caudales (Figura 4).

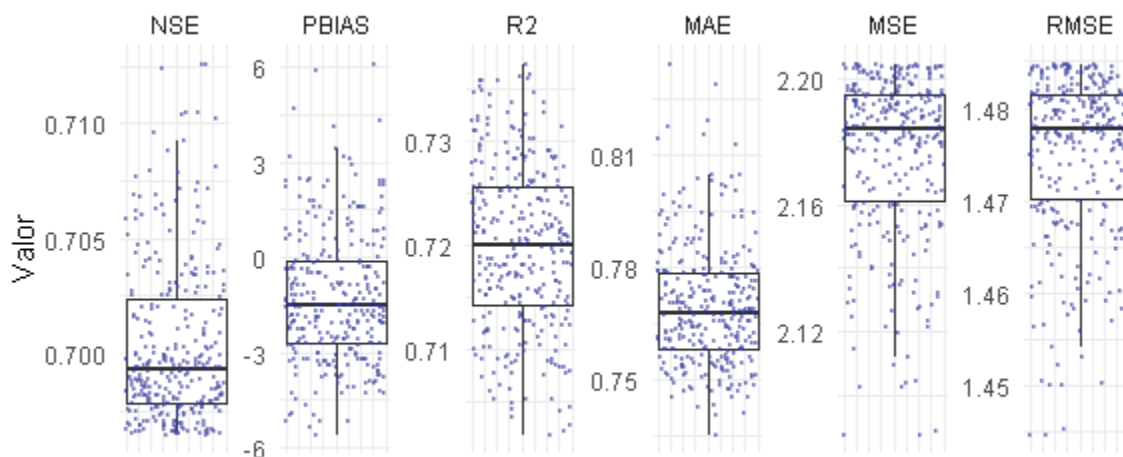


Figura 4. Distribución de los coeficientes de evaluación y error de las mejores 300 simulaciones.

En cuanto a las métricas de error, el MSE oscila entre 2,087 (m³/s)² y 2,204 (m³/s)², con una media de 2,176 (m³/s)². Esta métrica penaliza más los errores grandes al elevar al cuadrado las diferencias, lo que permite identificar simulaciones con desviaciones significativas. La raíz del error cuadrático medio (RMSE) varía entre 1,445 m³/s y 1,485 m³/s, también conlleva una penalización más alta de los errores grandes al elevar al cuadrado las diferencias, pero permite una mejor interpretación debido a que el RMSE mantiene las mismas unidades que los datos observados. El error absoluto medio (MAE) se sitúa entre 0,7352 m³/s y 0,8342 m³/s. A diferencia del RMSE y el MSE, el MAE es menos sensible a valores atípicos al considerar únicamente el valor absoluto de los errores. La envolvente generada a partir de las simulaciones realizadas muestra que el rango de caudales máximos y mínimos observados queda dentro de los rangos de capacidad del modelo calibrado, lo que indica una adecuada representación de la variabilidad hidrológica.

Además, el caudal medio simulado sigue de cerca la tendencia de los caudales observados, lo que sugiere una buena calibración del modelo hidrológico a escala de caudales medios mensual (Figura 5).

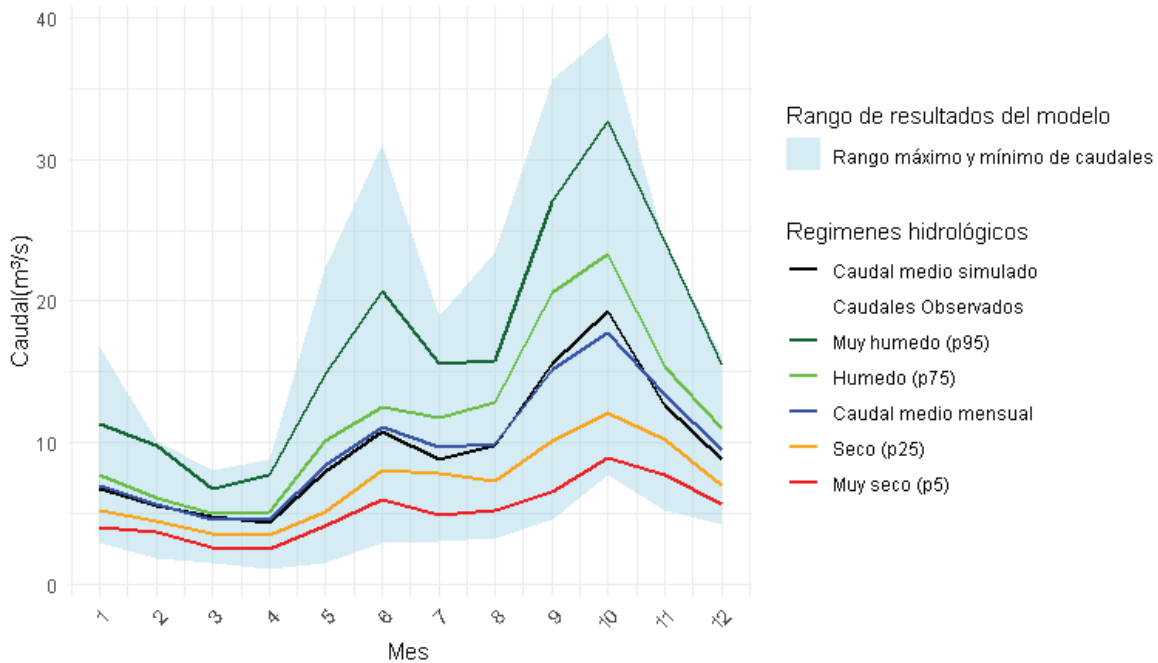


Figura 5. Régimen hidrológico observado y rango de caudales máximo mínimo y medio de las simulaciones realizadas en la cuenca del río Agua Caliente.

Se evidencia una clara estacionalidad en los caudales, con un incremento a partir del mes 5 y un pico máximo entre los meses 9 y 10, lo que refleja la influencia del régimen de lluvias en la cuenca. Los percentiles de caudal (p95, p75, p25 y p5) muestran que el modelo es capaz de capturar los extremos hidrológicos, brindando una representación confiable de los eventos húmedos y secos. El modelo hidrológico HBV Light fue parametrizado para tres tipos de cobertura del suelo: forestal, agrícola y sin cobertura vegetal, considerando tres parámetros clave: FC (capacidad de campo), LP (fracción del almacenamiento máximo de agua en el suelo a partir de la cual la evapotranspiración potencial es máxima) y BETA (control de la distribución del agua entre percolación y escorrentía).

El FC mostró los valores más altos en suelos con cobertura forestal, entre 850,0 y 949,9 mm, lo que indica una mayor capacidad de retención de agua en comparación con los suelos agrícolas (550,0 – 650,0 mm) y los suelos sin cobertura vegetal (140,0 – 180,0 mm). El LP, presentó un rango similar entre los tres tipos de cobertura, con valores entre 0,1000 y 0,9999, lo que sugiere una distribución homogénea en la fracción del almacenamiento de agua en el suelo. El parámetro BETA, que regula la distribución del agua entre percolación y escorrentía, mostró los valores más altos en los suelos con cobertura forestal (2,000 – 3,999), indicando una mayor tendencia a la infiltración del agua. Los suelos agrícolas presentaron valores intermedios (1,000 – 3,000), mientras que los suelos sin cobertura vegetal dieron los valores más bajos (0,2501 – 1,9998), lo que sugiere una mayor escorrentía superficial y menor capacidad de infiltración en ausencia de vegetación.

El Cuadro 3 muestra los parámetros de calibración obtenidos para generar las series de caudales simulados en la subcuenca del río Agua Caliente utilizados para el modelo de la subcuenca del río Retes. Los valores resultantes de la calibración son consistentes con las características esperadas de cada uso de suelo.

Cuadro 3. Parámetros del modelo hidrológico calibrado de la subcuenca Río Agua Caliente.

Rutina	Parámetro	Descripción	Valor			Unidades
			Cobertura			
			Forestal (1)	Vegetación baja (2)	Sin cobertura (3)	
Humedad del suelo	FC	Cantidad máxima de agua que el suelo puede retener antes de que ocurra percolación.	850.0 - 949.9	550.0 - 650.0	140.0 - 180.0	mm
	LP	Fracción del almacenamiento máximo de agua en el suelo a partir de la cual la evapotranspiración potencial es máxima.	0.8000 - 0.9998	0.6000 - 0.9997	0.5000 - 0.9999	
	BETA	Controla la distribución del agua entre la percolación y la escorrentía en función del contenido de humedad del suelo.	2.000 - 3.999	1.000 - 3.000	0.2501 - 1.9998	
Respuesta	K0	Coefficiente de recesión para el flujo de respuesta rápida.	0.3000 - 0.5827			día ⁻¹
	K1	Coefficiente de recesión para el flujo intermedio, relacionado con el almacenamiento en el suelo y el flujo subsuperficial.	0.05000 - 0.08999			día ⁻¹
	K2	Coefficiente de recesión para el flujo base, que representa la descarga de los acuíferos.	0.001004 - 0.039929			día ⁻¹
	UZL	Umbral de almacenamiento en la zona superior, a partir del cual se activa el flujo de recarga rápida.	30.00 - 59.88			mm
	PERC	Tasa máxima de percolación desde el almacenamiento intermedio hacia el almacenamiento base	1.067 - 3.000			mm/día
Enrutamiento	MAXBAS	Parámetro que suaviza el hidrograma mediante una función de distribución triangular, representando el retardo en la escorrentía	1.300 - 1.700			días
Otros	Cet	Factor de reducción de la evapotranspiración en función de la disponibilidad de agua en el suelo	0.02000 - 0.08999			

El K0 presentó un rango entre 0,3000 y 0,5827 día⁻¹, que define la rapidez con que se produce la disminución del flujo inicial y la transferencia de agua desde la superficie hacia los cauces. El K1 mostró valores entre 0,05000 y 0,08999 día⁻¹, lo que indica una recesión más lenta del flujo intermedio, relacionado con el movimiento del agua a través de las capas más profundas del suelo hacia los acuíferos. El K2 presentó valores entre 0,001004 y 0,039929 día⁻¹, reflejando una disminución más gradual del flujo base, lo que implica una liberación sostenida de agua

almacenada en los acuíferos. El UZL tuvo un rango entre 30,00 y 59,88 mm, que define el punto a partir del cual se activa el flujo de recarga rápida, influyendo directamente en la generación de escorrentía superficial. El PERC osciló entre 1,067 y 3,000 mm/día, indicando una tasa moderada de percolación desde el almacenamiento intermedio hacia el base, clave para la recarga de los acuíferos y la distribución del agua en el sistema. El MAXBAS presentó valores entre 1,300 y 1,700 días, sugiriendo un retardo en la escorrentía, lo cual es esencial para representar la dispersión temporal del flujo en la cuenca. El Cet tuvo un rango de 0,02000 a 0,08999, ajustando la evapotranspiración según la disponibilidad de agua en el suelo, lo que es particularmente relevante en áreas con limitaciones hídricas.

Modelación cuenca río Retes

La cuenca del río Retes tiene un área de 280,4 ha y se ubica sobre la elevación de 2470 msnm hasta los 3425 msnm, cuyo principal uso del suelo es la vegetación densa y baja (Cuadro 4).

Cuadro 4. Distribución del tipo de cobertura en función de la elevación para la cuenca del río Retes.

Intervalo (msnm)	Elevación media (m)	Cobertura			Total
		Forestal (1)	Vegetación baja (2)	Sin cobertura vegetal (3)	
2470 - 2700	2585	9,04%	1,81%	0,00%	10,86%
2700 - 3000	2850	71,98%	6,64%	0,07%	78,69%
3000 - 3425	3212,5	10,45%	0,00%	0,00%	10,45%
Total		91,48%	8,45%	0,07%	100,00%

Nota. Basado en la división de zonas de elevación de la cuenca del río Agua Caliente, con el fin de poder utilizar la calibración de parámetros realizada en esta cuenca.

La aplicación del modelo HBV calibrado sobre la cuenca del río Retes utilizando la parametrización obtenida para las mejores 300 corridas proyecta resultados conservadores que mejoran cuando la comparación de las simulaciones con el caudal observado se realiza para el periodo de seco. Para este periodo de tiempo de enero a abril, se obtuvo que, de la envolvente resultante, el percentil 10 es el que mayor acercamiento tuvo respecto al caudal observado (Figura 6).

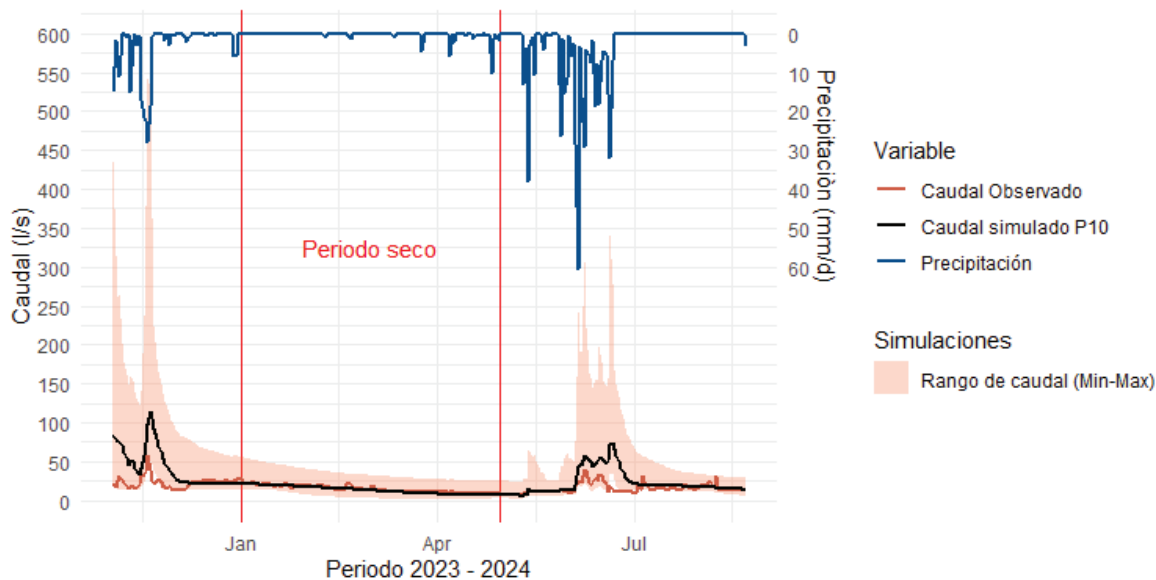


Figura 6. Caudales observados y simulados obtenidos al aplicar el modelo calibrado a la cuenca del río Retes.

La comparación presenta un buen ajuste con los datos reales como lo indican los coeficientes obtenidos. El coeficiente de determinación $R^2=0,865$ sugiere que el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados puede ser explicada por el modelo simulado, lo que indica una alta correlación entre ambos conjuntos de datos. El índice de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) de 0,76 sugiere que el modelo es capaz de capturar adecuadamente la dinámica del sistema hidrológico en estudio. Además, el error cuadrático medio (RMSE) de 2,32 y el error absoluto medio (MAE) de 1,7 proporcionan una medida de la magnitud de los errores entre los caudales simulados y observados relativamente aceptables.

Discusión

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, representada por el parámetro FC (Capacidad de Campo), mostró en este estudio valores de 850,0–949,9 mm para cobertura forestal, 550,0–650,0 mm para vegetación baja y 140,0–180,0 mm para áreas sin cobertura. Estos resultados son consistentes con valores reportados en la literatura para coberturas forestales. Por ejemplo, Huang et al. [8] reportaron un valor de FC de 915 mm para zonas forestales en China, mientras que Méndez y Calvo-Valverde [11] encontraron valores de 900 mm en subcuencas del río Agua Caliente en Costa Rica que es una subcuenca de la cuenca en estudio.

La fracción del almacenamiento máximo de agua (LP) presentó rangos de calibración de 0,8000–0,9998 para áreas forestales, 0,1000–0,9997 para vegetación baja y 0,1000–0,9999 para áreas sin cobertura. Estos rangos abarcan valores reportados en estudios previos, como 0,90 según Seibert y Vis [19]. Huang et al. [8] también encontraron un valor de LP de 0,88 para cobertura forestal, mientras que Méndez y Calvo-Valverde [11] reportaron un valor de 0,87.

El parámetro BETA, que controla la distribución del agua entre percolación y escorrentía, presentó en este estudio un rango de 2,000–3,999 para cobertura forestal, 1,000–3,000 para vegetación baja y 0,250–1,999 para áreas sin cobertura, valores coherentes con los reportados por con un valor de BETA de 2,9 para cobertura forestal, mientras que Méndez y Calvo-Valverde [11] reportaron un valor de 3,1 en Costa Rica, lo que refuerza que la vegetación forestal favorece la infiltración y reduce la escorrentía superficial.

La aplicación del modelo HBV Light en la cuenca Retes ha mostrado un desempeño satisfactorio, especialmente durante el período seco (enero a abril), con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,865. Este valor indica que el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados puede ser explicada por el modelo. El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) fue de 0,76, sugiriendo que el modelo captura adecuadamente la dinámica hidrológica. Además, el error cuadrático medio (RMSE) de 2,32 y el error absoluto medio (MAE) de 1,7 reflejan una magnitud de error relativamente baja. Estos resultados son consistentes con estudios previos que han empleado el modelo HBV Light en diferentes regiones y contextos climáticos, donde se ha destacado la sensibilidad del modelo a la calibración y su capacidad de reproducir caudales de forma eficiente una vez ajustado.

En contextos tropicales, la aplicación del modelo HBV Light en la cuenca del río Sardinal en Costa Rica reportó un NSE de 0,78 y un RMSE de 2,1, mientras que en la cuenca del río Jequetepeque en Perú se obtuvo un NSE de 0,72 y un R^2 de 0,85, valores que son consistentes con los alcanzados en este estudio. Estos resultados evidencian la adaptabilidad del modelo HBV Light a condiciones de alta precipitación y cobertura forestal, así como a ambientes semiáridos, siempre que se realicen calibraciones y validaciones adecuadas.

La flexibilidad del modelo HBV para ajustarse a diversas condiciones hidrológicas ha sido ampliamente documentada, lo que justifica su aplicación en estudios de regionalización. En este análisis, la regionalización de parámetros por medio de la generación de envolventes permitió obtener una parametrización conservadora que mejoró la simulación durante el periodo de estiaje. Esta metodología es similar a la utilizada en estudios que emplearon técnicas de aprendizaje automático para regionalizar parámetros hidrológicos, alcanzando valores de NSE entre 0,70 y 0,80. Además, estrategias basadas en la identificación de similitudes físicas y climáticas entre cuencas han mostrado eficacia para alcanzar NSE superiores a 0,70 en cuencas tropicales y semiáridas.

La necesidad de utilizar enfoques de regionalización robustos para mejorar la transferibilidad de parámetros entre cuencas no aforadas también ha sido señalada, coincidiendo con la metodología empleada en el presente estudio [8]. Los coeficientes de evaluación obtenidos en la cuenca Retes, con parámetros calibrados en la cuenca Agua Caliente, mostraron que la simulación explica el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados durante el estiaje, valor comparable con rangos reportados en cuencas de distintas condiciones climáticas.

El índice de eficiencia NSE obtenido (0,76) confirma que el modelo logró capturar adecuadamente la dinámica hidrológica del sistema en época de estiaje. Este desempeño es similar al reportado en estudios que aplicaron regionalización de parámetros en cuencas de clima templado y semiárido, con valores de NSE entre 0,68 y 0,82, y en cuencas de clima oceánico y continental con valores entre 0,55 y 0,85. Incluso en regiones de clima subártico, donde se reportan valores de NSE ligeramente más bajos (alrededor de 0,65), los resultados son consistentes considerando la variabilidad entre periodos húmedos y secos.

Conclusiones

La aplicación del modelo HBV calibrado en la cuenca del río Agua Caliente y su transferencia a la subcuenca del río Retes demostró ser una metodología efectiva para estimar caudales en cuencas anidadas utilizando métodos de regionalización. Los resultados mostraron un buen ajuste entre los caudales simulados y observados, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,865 y un índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,76. Esto indica que el 86,5% de la variabilidad en los caudales observados puede ser explicada por el modelo, validando la utilidad de la regionalización hidrológica para la estimación de caudales en cuencas con datos limitados.

Aunque el modelo mostró un desempeño aceptable, se identificó que la transferencia de parámetros introduce cierto grado de incertidumbre, especialmente en períodos de estiaje. El error cuadrático medio (RMSE) de 2,32 y el error absoluto medio (MAE) de 1,7 sugieren que, aunque el modelo es preciso, existen márgenes de mejora, particularmente en la calibración local y en la recopilación de datos hidrometeorológicos más detallados. Estos hallazgos resaltan la importancia de mejorar la representación de las características específicas de cada cuenca para reducir la incertidumbre y aumentar la precisión de las estimaciones.

Agradecimientos

- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)
- Sociedad de Usuarios de Agua: Río Reventado, Sanatorio 1 y 2, Hierbabuena, San Blas y El Rodeo de Tierra Blanca
- Dirección de Agua del MINAE

Referencias

- [1] N. Addor, G. Nearing, C. Prieto, A. J. Newman, N. Le Vine y M. P. Clark, "A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space," *Water Resources Research*, vol. 54, no. 11, pp. 8792–8812, Nov. 2018, doi: 10.1029/2018WR022606.
- [2] M. Ballesteros Vargas y T. López Lee, *El nexo entre el agua, la energía y la alimentación en Costa Rica: El caso de la cuenca alta del río Reventazón*, Serie Recursos Naturales e Infraestructura, no. 182. Santiago, Chile: CEPAL, 2017. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/42507/2/S1701032_es.pdf
- [3] H. E. Beck, M. Pan, P. Lin, J. Seibert, A. I. J. M. van Dijk y E. F. Wood, "Global fully distributed parameter regionalization based on observed streamflow from 4,229 headwater catchments," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 125, no. 17, Sep. 2020, doi: 10.1029/2019JD031485.
- [4] J. Carvajal, "Implementación de una metodología participativa de estrategias de adaptación al cambio climático en recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Reventado, Cartago, Costa Rica," Tesis de maestría, CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2014. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7081/Implementacion_de_una_metodologia_participativa.pdf
- [5] Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), *El clima, su variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Costa Rica, 2008.
- [6] W. Dou *et al.*, "Fuzzy kappa for the agreement measure of fuzzy classifications," *Neurocomputing*, vol. 70, nos. 4–6, pp. 726–734, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.neucom.2006.10.007.
- [7] E. V. García Medina, "Análisis comparativo de los modelos hidrológicos semidistribuidos GR4J, SOCONT y HBV aplicados al pronóstico," Tesis de licenciatura, Univ. Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, 2024.
- [8] S. Huang, S. Eisner, J. O. Magnusson, C. Lussana, X. Yang y S. Beldring, "Improvements of the spatially distributed hydrological modelling using the HBV model at 1 km resolution for Norway," *J. Hydrol.*, vol. 577, p. 123585, 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.051.
- [9] Y. Hundecha y A. Bárdossy, "Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model," *J. Hydrol.*, vol. 292, nos. 1–4, pp. 281–295, Jun. 2004, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.002.
- [10] J. Jenness y J. J. Wynne, *Cohen's kappa and classification table metrics 2.0: An ArcView 3.x extension for accuracy assessment of spatially explicit models*. Flagstaff, AZ, USA: U.S. Geological Survey, Southwest Biological Science Center, 2005. [En línea]. Disponible en: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/25707>
- [11] M. Méndez y L. Calvo-Valverde, "Development of the HBV-TEC hydrological model," *Procedia Eng.*, vol. 154, pp. 1116–1123, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.521.
- [12] N. Mizukami *et al.*, "Towards seamless large-domain parameter estimation for hydrologic models," *Water Resources Research*, vol. 53, no. 9, pp. 8020–8040, Sep. 2017, doi: 10.1002/2017WR020401.

- [13] N. Mizukami *et al.*, "On the choice of calibration metrics for 'high-flow' estimation using hydrologic models," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 2601–2614, Jun. 2019, doi: 10.5194/hess-23-2601-2019.
- [14] I. Narváez, "Percepción sobre la tendencia de caudales, precipitación, temperatura y cambio de uso del suelo con relación al uso y manejo del agua en la zona norte de Cartago, Costa Rica," Tesis, Costa Rica, 2013.
- [15] H. Ouatiki, A. Boudhar, A. Ouhinou, A. Beljadid, M. Leblanc y A. Chehbouni, "Sensitivity and interdependency analysis of the HBV conceptual model parameters in a semi-arid mountainous watershed," *Water*, vol. 12, no. 9, p. 2440, Aug. 2020, doi: 10.3390/w12092440.
- [16] S. Pool, D. Viviroli y J. Seibert, "Value of a limited number of discharge observations for improving regionalization: A large-sample study across the United States," *Water Resources Research*, vol. 55, no. 1, pp. 363–377, Jan. 2019, doi: 10.1029/2018WR023855.
- [17] T. Razavi y P. Coulibaly, "An evaluation of regionalization and watershed classification schemes for continuous daily streamflow prediction in ungauged watersheds," *Can. Water Resour. J.*, vol. 42, no. 1, pp. 2–20, Jan. 2017, doi: 10.1080/07011784.2016.1184590.
- [18] T. Sassolas-Serrayet, R. Cattin y M. Ferry, "The shape of watersheds," *Nat. Commun.*, vol. 9, no. 1, p. 3791, Sep. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06210-4.
- [19] J. Seibert y M. J. P. Vis, "Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 9, pp. 3315–3325, 2012, doi: 10.5194/hess-16-3315-2012.
- [20] Z. Song, J. Xia, G. Wang, D. She, C. Hu y S. Hong, "Regionalization of hydrological model parameters using gradient boosting machine," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 505–524, Jan. 2022, doi: 10.5194/hess-26-505-2022.
- [21] A. Trabado, "Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza," 2023. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14075/BCO24017604e>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *NotebookLM*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista. Además, utilizamos la herramienta de IA *Gemini* para traducir textos de este artículo. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Caracterización de microorganismos de importancia médica mediante espectroscopía Raman

Characterization of microorganisms of medical importance by Raman spectroscopy

Esteban Solís-Campos¹, Laura Rojas-Rojas², Erick Hernández-Carvajal³, Ernesto Montero-Zeledón⁴, Dionisio Gutiérrez-Fallas⁵

Fecha de recepción: 29 de mayo, 2025

Fecha de aprobación: 26 de setiembre, 2025

Solís-Campos, E; Rojas-Rojas, L; Hernández-Carvajal, E; Montero-Zeledón, E; Gutiérrez-Fallas, D. Caracterización de microorganismos de importancia médica mediante espectroscopía Raman. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 20-36.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7973>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 e.esolis.c@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5497-3201>
- 2 Laboratorio de Espectroscopía Molecular, Imagen y Color, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 laurarojas@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1096-7659>
- 3 Centro de Investigación en Biotecnología (CIB), Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 erhernandez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5585-9125>
- 4 Laboratorio de Espectroscopía Molecular, Imagen y Color, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 emontero@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>
- 5 Laboratorio de Espectroscopía Molecular, Imagen y Color, Escuela de Física. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 digutierrez2008@gmail.com
 <https://orcid.org/000-0001-7190-8858>



Palabras clave

Espectroscopía Raman; SERS; nanopartículas; identificación; bacterias; proteínas.

Resumen

La identificación rápida y confiable de microorganismos de importancia médica continúa siendo un desafío en el diagnóstico clínico. En este estudio se utilizó espectroscopía Raman, combinada con la técnica SERS (Surface Enhanced Raman Spectroscopy), como herramienta complementaria para la caracterización de bacterias y proteínas. Se analizaron tres especies bacterianas (*Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella enterica* y *Bacillus pumilus*), cuya identidad fue confirmada mediante secuenciación del gen ADN_r-16S, obteniéndose coberturas del 100 % y porcentajes de identidad entre 99 % y 100 %. En este estudio se optimizaron protocolos de síntesis de nanopartículas de plata y oro sintetizadas *ex situ* e *in situ*, evaluando el efecto del agente reductor, el pH y el tiempo de incubación. Las nanopartículas sintetizadas por el método *ex situ* y a pH 9 generaron espectros con mayor definición y menor interferencia de fluorescencia. Los espectros Raman obtenidos mostraron picos característicos asociadas a proteínas, ácidos nucleicos y componentes de la membrana celular bacteriana, en concordancia con la literatura. Los resultados demuestran que la metodología implementada permite obtener espectros reproducibles y diferenciables entre especies bacterianas, así como identificar picos estructurales en proteínas recombinantes. La espectroscopía Raman con SERS se confirma como una técnica rápida y complementaria para el análisis de material biológico de interés biomédico.

Keywords

Raman spectroscopy; SERS; nanoparticles; identification; characterization; bacteria; protein.

Abstract

Rapid and reliable identification of medically relevant microorganisms remains a challenge in clinical diagnostics. In this study, Raman spectroscopy combined with Surface Enhanced Raman Spectroscopy (SERS) was evaluated as a complementary tool for the characterization of bacteria and proteins. Three bacterial species (*Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella enterica*, and *Bacillus pumilus*) were analyzed. Silver and gold nanoparticles were synthesized using *ex situ* and *in situ* approaches, evaluating the effects of reducing agent, pH, and incubation time. Nanoparticles synthesized *ex situ* at pH 9 produced spectra with improved band definition and reduced fluorescence interference. The Raman spectra exhibited characteristic bands associated with proteins, nucleic acids, and bacterial cell wall components, consistent with previous reports. These results demonstrate that the implemented methodology enables reproducible spectral profiling and differentiation among bacterial species, as well as structural characterization of recombinant proteins. Raman spectroscopy combined with SERS is confirmed as a rapid and complementary technique for the analysis of biologically relevant material.

Introducción

Según la Organización Mundial de la Salud [1], [2], anualmente, 600 millones de personas se enferman por consumir alimentos contaminados, de las que cerca de 420 000 mueren, lo que, en términos económicos, representa una pérdida de productividad cercana a los 95 000 millones de dólares anuales. En Costa Rica, de acuerdo con los datos de Vigilancia de la Salud, anualmente se atiende un promedio de 312 000 episodios de diarrea, de los cuales mueren alrededor de

75 personas [2]. Una gran cantidad de estos casos son provocados por bacterias del género *Salmonella*, uno de los más importantes en el área clínica. También es preocupante que Costa Rica reporte varios casos de infección y muerte por propagación nosocomial de *Klebsiella pneumoniae*, resistente a antibióticos β -lactámicos [3]. Esta problemática vuelve fundamental la detección oportuna de cepas sospechosas y su confirmación, con el fin de que se tomen las medidas terapéuticas apropiadas para el manejo de los pacientes [4] [5]. Los procesos de identificación bacteriana en el área clínica siguen siendo complejos y lentos a nivel mundial [6]. La detección convencional está basada en métodos fenotípicos [7], los cuales requieren, como mínimo, 24-72 h para tener los resultados [8], [9], [10]. En contraste, los métodos genéticos (p. ej. PCR y secuenciación), proteicos (p. ej. espectrometría de masas) e inmunológicos (p. ej. ELISA) han logrado posicionarse como una alternativa relativamente rápida [11], sin embargo, involucran procedimientos complejos y necesitan de personal altamente calificado, limitando su extensión en el diagnóstico de enfermedades en zonas menos preparadas, o en la identificación de enfermedades emergentes que requieran una baja relación costo/eficiencia [8], [9]. Un sistema ideal de detección bacteriana debe cumplir con una serie de análisis en tiempo real, altamente sensibles, efectivos, baratos y fáciles de operar; con el fin de identificar los microorganismos causantes y tratar las infecciones e intoxicaciones a tiempo [8], [12], [13]. Los métodos de espectroscopía vibracional, como la Espectroscopía Raman, proporcionan información de la que es posible generar “huellas moleculares” bacterianas, cumpliendo con la mayoría de los criterios mencionados anteriormente. Si se cuenta con el equipo, ya sea un microscopio Raman con Transformada de Fourier, Raman FT (se pueden obtener espectros directamente) o un sistema Raman Dispersivo, que regularmente requiere el uso de la técnica SERS para el análisis de muestras biológicas, son herramientas de alta sensibilidad, de fácil preparación de las muestras, pero también de rápida y económica obtención de los espectros, lo que constituye una alternativa para la detección e identificación de microorganismos o sus estructuras, por medios tradicionales, de muestras obtenidas en la práctica diaria [12]. Por medio del uso de sistemas ópticos con láseres colimados sobre superficies muy pequeñas, la técnica SERS amplifica la señal Raman del material biológico mediante fenómenos de resonancia que ocurren con electrones sobre algunos puntos específicos (llamados puntos calientes) en sustratos metálicos o nanopartículas (NPs) de metales nobles, como oro o plata en dispersión coloidal [14]. Utilizando NPs recubiertas con SiO_2 , también se han obtenido espectros de las bacterias: *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *B. anthracis* Sterne, *B. thuringiensis*, *Escherichia coli* y *Salmonella typhimurium* [15]. Con SERS se ha progresado en la habilidad de distinguir rápidamente entre especies y cepas, con información de alta calidad. Zhou y colaboradores [16] lograron diferenciar tres cepas de *E. coli* entre sí y de *Staphylococcus epidermidis* por medio de los espectros obtenidos con la síntesis *in situ* de AgNPs. Particularmente, las AgNPs han aumentado su importancia desde diversas vertientes en el campo de la biomedicina [17], entre ellas, los estudios con actividad biocida y el aprovechamiento de las propiedades plasmónicas en la región visible del espectro electromagnético [18]. De acuerdo con Wan y colaboradores [18], en el campo de la síntesis de AgNPs, el método de Lee-Meisel es uno de los más utilizados, el cual se basa en la reducción de la plata con $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (ácido cítrico) a partir de una disolución acuosa de AgNO_3 (nitrato de plata) [19]. Alternativamente, se pueden formar AgNPs con reductores fuertes, como NaBH_4 (borohidruro de sodio) [20] o NH_2OH (hidroxilamina) [16]. La caracterización de microorganismos de origen biológico permitiría establecer protocolos para utilizar estas novedosas técnicas como complemento de las técnicas tradicionales.

Metodología

Crecimiento bacteriano

Obtención, cultivo y almacenamiento de bacterias

Las bacterias *Klebsiella pneumoniae* y *Salmonella enterica* fueron proporcionadas por el Laboratorio de Microbiología del Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), Costa Rica. Por su parte, la *Bacillus pumilus* se obtuvo del Laboratorio de Biología Molecular del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB), Costa Rica. Durante todo el proyecto, se ejecutaron procedimientos de preservación de las cepas, realizando subcultivos en placas con medio semi-sólido compuesto de caldo nutritivo (8 g/L, PhytoTechnology Laboratories®) y agar (15 g/L, Difco™), se incubaron a 37 °C durante 24 h y, posteriormente, se almacenaron a temperatura ambiente o bajo refrigeración (4 °C) hasta el siguiente subcultivo.

Pre-cultivo y cultivo de bacterias

Se realizó un aislamiento por rayado de las bacterias *K. pneumoniae*, *S. enterica* y *B. pumilus* en placas de agar nutritivo y se incubó a 37 °C por 24 h. Posteriormente, se aisló una colonia (2 mm - 5 mm diámetro) y se pre-cultivó en caldo nutritivo a 37 °C, con agitación por 18 h para cada cepa bacteriana. A partir de los pre-cultivos homogenizados se tomó 1,5 mL y, por triplicado, se inoculó en 13,5 mL de caldo nutritivo, se incubó a 37 °C y agitación por 3 h. Para determinar la concentración de las bacterias, se realizaron diluciones seriadas a razón de 10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-6} , 10^{-7} y 10^{-8} en solución salina (0,85 % m/v NaCl), a partir de las cuales, mediante un proceso de incubación, conteo de las unidades formadoras de colonias y correlación se obtuvieron las concentraciones.

Preparación de las muestras bacterianas para la medición en Raman

Los cultivos obtenidos se homogenizaron utilizando un vórtex por 5 s y se centrifugaron a 5000 rpm por 10 min a 4 °C. Los precipitados bacterianos se lavaron dos veces con agua ultrapura, se descartó el sobrenadante y se almacenaron a 4 °C hasta su medición con espectroscopía Raman.

Caracterización bioquímica y genética de las cepas bacterianas

Identificación bioquímica mediante ensayos Gram y Biolog

Se realizaron tinciones de Gram para cada bacteria, siguiendo el protocolo recomendado por Sutton [21]. Adicionalmente, se realizaron pruebas Biolog, para determinar la especie bacteriana.

Los resultados de la identificación fenotípica se obtuvieron utilizando el lector de placas Biolog y el software OmniLog® Data Collection. Finalmente, se obtuvieron los resultados de la comparación con la base de datos de GEN III y se analizaron los valores de SIM, DIST, tipo de organismo y especie.

Identificación genotípica mediante secuenciación de la región genómica de la subunidad 16S ribosomal (ADNr-16S)

La extracción de ADN se realizó a partir del cultivo de una colonia de cada bacteria de interés. Se incubó a 37 °C con agitación por 16 h. Los cultivos homogenizados se centrifugaron en recipientes de 2 mL a 15000 rpm por 10 min y a 4 °C, se descartó el sobrenadante y se realizaron dos lavados del precipitado bacteriano con agua libre de nucleasas, centrifugando bajo las

mismas condiciones. Posteriormente, se realizó la extracción de ADN genómico siguiendo el protocolo de purificación para bacterias Gram negativas [22], incubando 1 h en ARNasa en el momento respectivo. Dicho procedimiento se realizó por duplicado para cada bacteria. Posteriormente, mediante la técnica de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) se amplificó la región génica codificante de la subunidad 16S ribosomal (ADNr-16S). Este procedimiento se adaptó del protocolo recomendado por [23], tomando en cuenta las sugerencias de algunos autores [23], [24], [25]. Para amplificar el gen ADNr-16S de cada bacteria, se prepararon mezclas de los siguientes reactivos: imprimadores universales 27f (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') y 1492r (5'-TACGGYTACCTTGTACGACTT-3'), desoxinucleótidos trifosfato (dNTPs) libres, amortiguador de reacción y agua libre de nucleasas. Una vez que el termociclador alcanzó la temperatura de calentamiento inicial (95 °C), se añadieron la polimerasa y la muestra de ADN genómico. Se programó el termociclador Veriti™ para realizar 35 ciclos con el siguiente perfil térmico: calentamiento inicial y desnaturalización a 95 °C por 1 min, alineamiento a 52 °C por 30 s y extensión a 72 °C por 90 s. Dicho perfil está basado en lo recomendado por [22] para el amortiguador de reacción utilizado y por la base de datos de N. E. Biolabs [26]. Una vez confirmados y cuantificados los productos de PCR se enviaron 15 µL por muestra a la empresa Psomagen Maryland (E.U.A), para obtener la secuencia nucleotídica de los ADNr-16S de cada bacteria. Las secuencias amplificadas por duplicado de cada imprimador se analizaron por separado, se realizó un alineamiento global entre las repeticiones de los fragmentos seleccionados con la herramienta Clustal Omega [27], obteniendo una secuencia consenso por cada imprimador. Posteriormente, se realizó un alineamiento local de cada secuencia consenso con la base de datos de GenBank, disponible en el Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI) de Estados Unidos [28]. Se analizaron los valores de *query cover*, *E value* y porcentaje de identidad para identificar el organismo al que pertenecía cada fragmento alineado.

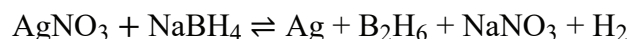
Preparación y caracterización de las proteínas

Se utilizaron conectores del factor VIII y trombina, proteínas que son importantes en los mecanismos que conducen a la formación de coágulos. El procedimiento de preparación contempla la clonación de los conectores FVIIIa1 y FVIIIa3, la transformación de cepas de *E. coli* BL21(DE3) pLys S. Luego de un proceso de selección e incubación se extrajeron las proteínas sobre expresadas en *E. coli* mediante lisis celular por congelación/descongelación y la respectiva purificación. La autenticidad y pureza de los fragmentos recombinantes purificados se comprobó con el análisis de alícuotas de las proteínas purificadas mediante espectrometría de masas (MALDI TOF/TOF). Se evaluó la masa de cada uno de los fragmentos recombinantes sin digerir (masa total) y digeridos con las endoproteinasas Asp-N o tripsina (Roche- Diagnostics), según correspondía.

Síntesis de nanopartículas

Síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs)

Las AgNPs se sintetizaron por medio de la reducción de iones Ag⁺ (0,02 M) con una disolución de borohidruro de sodio (NaBH₄), según la ecuación:



El proceso de reducción se realizó con dos métodos principales: *in situ* y *ex situ*. El método *in situ*, corresponde a una reducción de los iones de plata en la mezcla acuosa de Ag⁺ y bacterias, mientras que en el método *ex situ*, la reducción de los iones plata, se realiza aparte

del concentrado bacteriano [19]. Cada uno de los métodos de síntesis de AgNPs, descritos anteriormente, se realizó con seis diferentes valores de pH (7, 8, 9, 10, 11 y 12) en el agente reductor y con cuatro diferentes proporciones molares (1:1, 1:2, 1:3 y 1:4), por triplicado.

Síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) ex situ

Las reacciones de síntesis se llevaron a cabo en tubos cónicos para microcentrífuga. Por medio de *vórtex*, se mezclaron durante 10 s los volúmenes requeridos de agua ultrapura y AgNO₃, luego se añadió la cantidad de NaBH₄ (0,02 M) para lograr la relación molar de interés. Inmediatamente, se mezcló por medio de *vórtex* hasta observar un cambio de coloración (amarillo oscuro, café o verde musgo). Finalmente, se añadió 1 mL de la suspensión de AgNPs recientemente sintetizadas al concentrado bacteriano y se mezcló en *vórtex* durante 10 s.

Síntesis de nanopartículas de plata (AgNPs) in situ

Este procedimiento es muy similar al anterior; no obstante, en la primera mezcla están presentes el precipitado bacteriano, el volumen de agua y AgNO₃, los cuales se mezclan hasta homogenizar la suspensión, incubándose por 5 min a temperatura ambiente, para promover la interacción de los iones Ag⁺ con las bacterias. Posteriormente, se añadió el NaBH₄ con el mismo procedimiento que en el método *ex situ*.

Síntesis de nanopartículas de oro (AuNPs)

Las AuNPs se sintetizaron por medio de la reducción de los iones AuCl₄⁻ (0,02 M) con una disolución de NaBH₄ y citrato de sodio como estabilizante, según la ecuación de la reacción:



Para llevar a cabo el proceso de reducción se evaluó el método *ex situ*, tal y como se describió para la síntesis de AgNPs. Se probaron seis diferentes valores de pH (7, 8, 9, 10, 11 y 12) en el agente reductor por triplicado, concluyendo que la mejor proporción molar AuCl₄⁻:NaBH₄ en las mezclas de síntesis es 1:1,5. En todas las reducciones se añadió 0,05 % (m/v) de citrato de sodio como agente estabilizante.

Síntesis de nanopartículas de oro (AuNPs) ex situ

Las reacciones de síntesis se llevaron a cabo en tubos para microcentrífuga. Por medio de *vórtex*, se mezclaron durante 10 s los volúmenes requeridos de agua ultra pura, HAuCl₄ y citrato de sodio. Se dejó reposar por 5 min, luego se añadió la cantidad correspondiente de NaBH₄ (0,02 M) para lograr la relación molar de interés e inmediatamente se mezcló por medio de *vórtex* hasta observar un cambio de coloración (desde rosado pálido, hasta morado oscuro). Finalmente, se añadió 0,5 mL de la suspensión de AuNPs, recientemente sintetizadas, al concentrado bacteriano, mezclándose en *vórtex* durante 10 s.

Preparación de las muestras para la obtención de los espectros Raman

Las muestras preparadas se colocaron sobre portaobjetos de vidrio previamente incubados por 30 min en alcohol al 90 %, colocados en baño ultrasónico en acetona (20 min) y posteriormente enjuagados con agua destilada. Se realizaron pruebas de cultivo de bacterias en los portaobjetos que confirmaron la ausencia de contaminación previa. Finalmente, los espectros se obtuvieron con un microscopio dispersivo Raman confocal, modelo DXR de Thermo Scientific, con detector del tipo CCD, equipado con láseres de diodos con longitud de onda de 532 nm (Potencia máxima de 10 mW) y 780 nm ($P_{\text{máx}} = 24 \text{ mW}$) y un láser de gas de He-Ne de 633 nm ($P_{\text{máx}} = 8 \text{ mW}$); con potencias que varían en pasos de 0,1 mW hasta su valor máximo.

Resultados

Identificación de las cepas bacterianas

Las cepas bacterianas *Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella enterica* y *Bacillus pumilus* fueron cultivadas y concentradas siguiendo los protocolos descritos en la metodología. A partir del conteo en placa se obtuvieron concentraciones finales de $(1,24 \pm 0,04) \times 10^9$ UFC/mL para *Klebsiella pneumoniae*, $(1,07 \pm 0,19) \times 10^9$ UFC/mL para *Salmonella enterica* y $(4,55 \pm 0,55) \times 10^8$ UFC/mL para *Bacillus pumilus*, las cuales se utilizaron en las mediciones Raman posteriores.

La identificación fenotípica mediante tinción de Gram confirmó que *K. pneumoniae* y *S. enterica* corresponden a bacterias Gram negativas, mientras que *B. pumilus* es Gram positiva. Los ensayos bioquímicos Biolog permitieron evaluar el metabolismo de 71 sustratos como fuente de carbono y 23 condiciones de sensibilidad química de las cepas bacterianas. Sin embargo, los valores de similitud (SIM < 0,50) y distancia (DIST > 5,0) obtenidos no permitieron discriminar entre los géneros de interés y otros géneros evolutivamente cercanos, ver Cuadro 1.

Cuadro 1. Similitud y distancia estadística con la base de datos GEN III de las especies probables en la identificación bioquímica de las 3 cepas bacterianas en estudio mediante Biolog.

Muestra en estudio	SIM (Biolog)	DIST (Biolog)	Especies probables (Biolog)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	0,302	6,578	<i>Klebsiella</i> sp.; <i>K. oxytoca</i> ; <i>K. pneumoniae</i> ss <i>pneumoniae</i>
<i>Salmonella enterica</i>	0,162	8,000	<i>Salmonella enterica</i> (gp1) ST typhimurium; <i>Salmonella enterica</i> (gp1).
<i>Bacillus pumilus</i>	0,157	11,490	<i>Bacillus pseudomycooides</i>

La identificación definitiva se realizó mediante la secuenciación del gen de la subunidad 16S ribosomal. El alineamiento local de las secuencias mostró coberturas del 100 %, valores de error iguales a cero y porcentajes de identidad del 100 % para *K. pneumoniae* y *S. enterica*, y del 99 % para *B. pumilus*, ver Cuadro 2. Estos resultados confirmaron la identidad taxonómica de las tres cepas bacterianas utilizadas en el estudio.

Para una identificación más precisa se realizó una secuenciación del gen 16S ribosomal. Los resultados del alineamiento de las secuencias consenso obtenidas del gen 16S, generados mediante alineamiento global (ClustalO), demostraron la identidad de cada bacteria con porcentajes y coberturas de prácticamente el 100 %. Este procedimiento permitió identificar las bacterias Gram negativas de *Klebsiella pneumoniae* (K) y *Salmonella enterica* (S), y la Gram positiva de *Bacillus pumilus* (B) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Resultados del alineamiento local realizado a partir de las secuencias consenso amplificadas del 16S ribosomal para cada imprimador de las cepas bacterianas en estudio.

Muestra	Imprimador	Tamaño de la secuencia consenso (pb)	Región del 16S abarcada ¹	Cobertura (%)	Valor de Error	Identidad (%)	Identidad de la bacteria	Número de accesoión
K	27f	350	V1, V2 y V3 ²	100	0	100	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	KY417867.1
	1492r	600	V6, V7, V8 y V9	100	0	100	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	KY417867.1
S	27f	350	V1, V2 y V3 ²	100	0	100	<i>Salmonella enterica</i>	LT795114.1
	1492r	500	V6 ² , V7, V8 y V9	100	0	100	<i>Salmonella enterica</i>	LT795114.1
B	27f	350	V1, V2 y V3 ²	100	0	99	<i>Bacillus pumilus</i>	KY508344.1
	1492r	500	V6, V7, V8 y V9	100	0	99	<i>Bacillus pumilus</i>	KY508344.1

¹Basadas en una numeración realizada para *E. coli* [29], [30]. ²Secuenciación parcial.

Síntesis y caracterización de nanopartículas

Se evaluaron metodologías de síntesis de nanopartículas metálicas de plata y oro mediante procedimientos *ex situ* e *in situ* para la optimización de los parámetros de la medición, como son: tiempo de exposición, número de exposiciones, longitud de onda del láser, selección del valor de la apertura y del lente objetivo del microscopio. A partir de estas pruebas se determinó que la metodología *ex situ* permitió obtener espectros con mayor definición de picos y menor interferencia por fluorescencia.

La formación de nanopartículas de plata se confirmó visualmente mediante el cambio de color de las suspensiones coloidales durante el proceso de síntesis. Las AgNPs sintetizadas mediante reducción con citrato de sodio presentaron morfología aproximadamente esférica y diámetros en el rango de 20 a 50 nm (Figura 1a). El tamaño y color de las nanopartículas de plata se corresponden con lo reportado en la literatura [31]. En contraste, las nanopartículas obtenidas mediante reducción con borohidruro de sodio mostraron una mayor heterogeneidad en tamaño y forma, asociada a un proceso de nucleación rápida a temperatura ambiente (Figura 1b) [32].

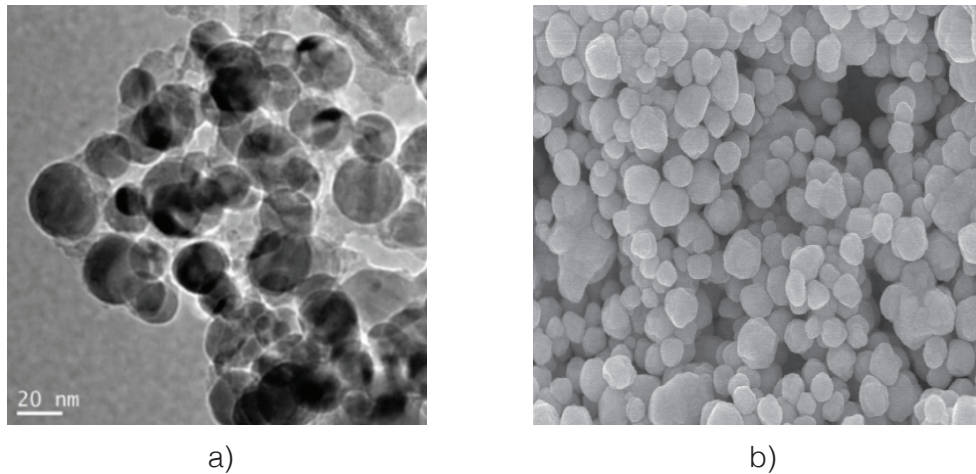


Figura 1. Micrografía de las nanopartículas de plata sintetizadas por reducción de AgNO_3 con (a) citrato de sodio y (b) con borohidruro de sodio. Ambas micrografías tienen la misma escala.

Las nanopartículas incubadas durante 45 min mostraron el mejor desempeño en la técnica SERS, evidenciado por un aumento en la intensidad relativa de las señales Raman obtenidas con el compuesto patrón 1,2-di(4-piridil) etileno [33]. Por esta razón, dichas condiciones se utilizaron en las mediciones posteriores del material biológico.

Adaptación e implementación de la metodología para la evaluación e identificación de material biológico mediante espectroscopía Raman.

Los espectros Raman de *K. pneumoniae*, *B. pumilus* y *S. enterica* se obtuvieron utilizando nanopartículas sintetizadas mediante metodologías *ex situ* e *in situ*. En el caso de *K. pneumoniae* y *B. pumilus*, ambos métodos produjeron espectros con posiciones de los picos similares; no obstante, los espectros obtenidos mediante el método *in situ* son menos definidos (Figuras 2 y 3).

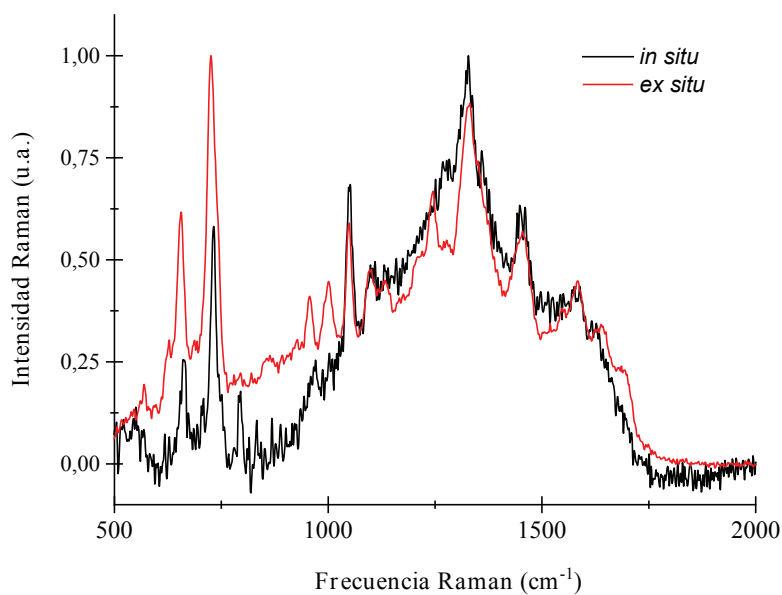


Figura 2. Espectro Raman de *Klebsiella pneumoniae* con nanopartículas obtenidas por medio de las metodologías *ex situ* (rojo) e *in situ* (negro).

Para *S. enterica* se observaron diferencias más notorias entre ambos métodos. Aunque la posición de los picos Raman se mantuvo constante, el método *ex situ* generó espectros con mayor definición y menor interferencia por fluorescencia, particularmente en la región cercana a 700 cm^{-1} (Figura 4).

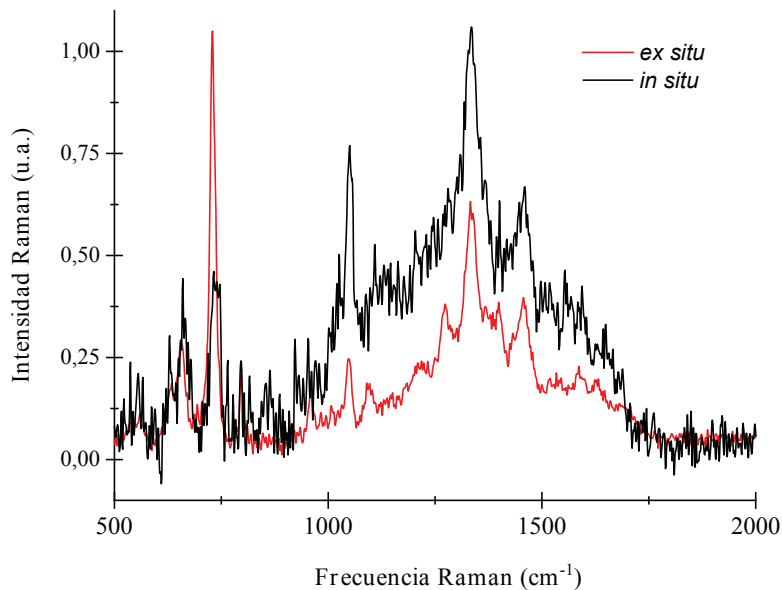


Figura 4. Espectro Raman de *Salmonella enterica* con nanopartículas generadas por medio de las metodologías *ex situ* (rojo) e *in situ* (negro).

Adicionalmente, se evaluó el efecto del pH de la solución reductora durante la síntesis de nanopartículas. Las mediciones realizadas en el rango de pH 9 a 12 mostraron que las nanopartículas sintetizadas a pH 9 produjeron los espectros Raman con mayor intensidad relativa y mejor definición de los picos (Figura 5). Por esta razón, este valor de pH fue seleccionado para las mediciones finales. Los espectros obtenidos son similares a los obtenidos por otros investigadores [33-34].

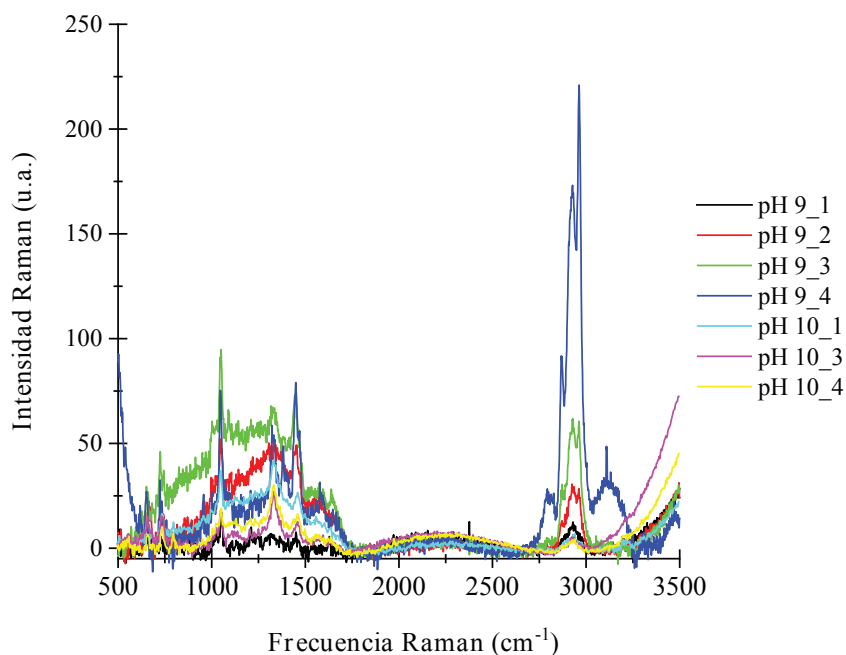


Figura 5. Espectro Raman de *Salmonella enterica* para diferentes valores de pH. Nótese que el espectro a pH 9,0 (azul) es el más definido.

La técnica SERS también se aplicó al análisis de proteínas recombinantes, incluyendo fragmentos del factor VIII y trombina. Se realizaron mediciones a diferentes concentraciones molares y utilizando nanopartículas de plata y oro con diámetros entre 50 y 70 nm. En las Figuras 6a y 6b se muestran ejemplos representativos de los espectros obtenidos para ambas proteínas, en los que se observan picos característicos asociadas a enlaces peptídicos y estructuras secundarias.

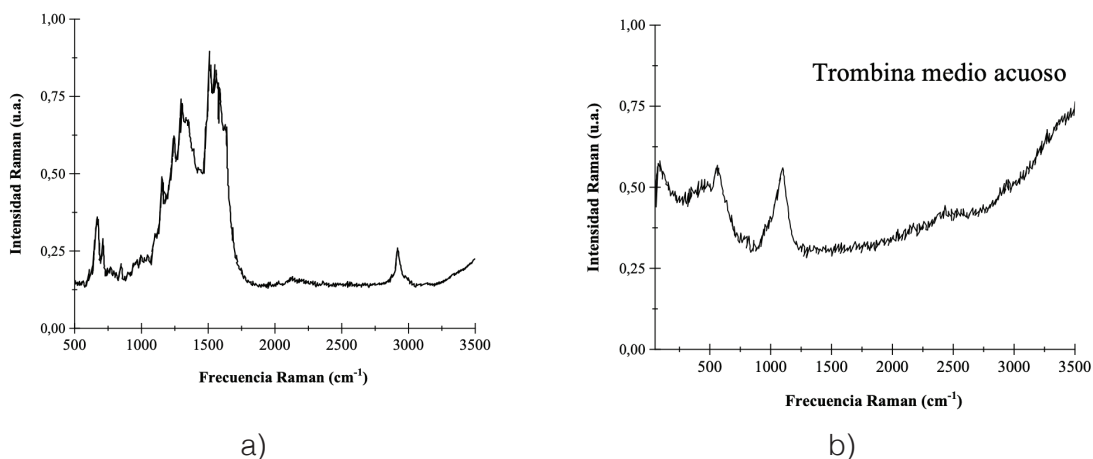


Figura 6 a) Espectro Raman de la proteína F8a3 a una concentración de 0,5 M y b) espectro Raman de la Trombina utilizando nanopartículas de plata con longitud de onda del láser de 532 nm.

Discusión

Los espectros Raman obtenidos para bacterias y proteínas corresponden a la superposición de las contribuciones vibracionales de sus principales componentes bioquímicos, incluyendo proteínas, ácidos nucleicos y lípidos [34]. En el caso de las bacterias, esta combinación genera un perfil espectral característico que puede considerarse una “huella dactilar” de cada especie [35].

Los picos observados en la región comprendida entre 600 y 1500 cm^{-1} de la figura 7 coinciden con asignaciones previamente reportadas en la literatura para microorganismos de interés biomédico [36], [37]. Por ejemplo, las vibraciones cercanas a 650 cm^{-1} y 1324 cm^{-1} se asocian a bases nitrogenadas presentes en ácidos nucleicos, mientras que el pico alrededor de 730 cm^{-1} se relaciona con componentes de la membrana celular bacteriana. Estas asignaciones concuerdan con la composición promedio del peso seco bacteriano, dominada por proteínas y ácidos nucleicos reportadas por [34] y [37].

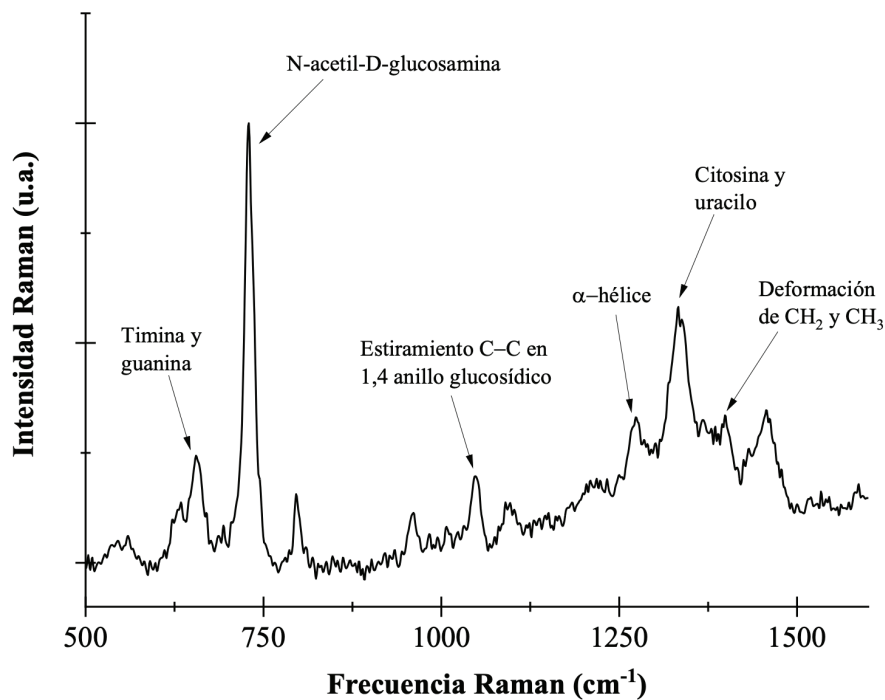


Figura 7. Identificación de algunas de las vibraciones Raman en el espectro de *Salmonella enterica*.

La comparación entre las metodologías de síntesis de nanopartículas mostró que el enfoque *ex situ* produce espectros con mejor definición y menor interferencia por fluorescencia, en concordancia con estudios previos que destacan la importancia del control del tamaño y la distribución de las nanopartículas para maximizar el efecto SERS. En particular, el desempeño superior observado a pH 9 sugiere que este parámetro influye directamente en la formación de nanopartículas con propiedades plasmónicas más favorables.

Aunque los espectros de las diferentes bacterias presentan similitudes en las posiciones de los picos Raman, el perfil global de cada espectro es heterogéneo [38], [39]. [40] Esta heterogeneidad permite diferenciar entre especies bacterianas cuando se analizan las intensidades relativas y la presencia de picos específicos, tal como se observa al comparar

los espectros de *K. pneumoniae* y *S. enterica* (Figuras 2–4). Estos resultados son consistentes con reportes previos y respaldan el uso de la espectroscopía Raman como herramienta complementaria para la identificación bacteriana, ver figura 8.

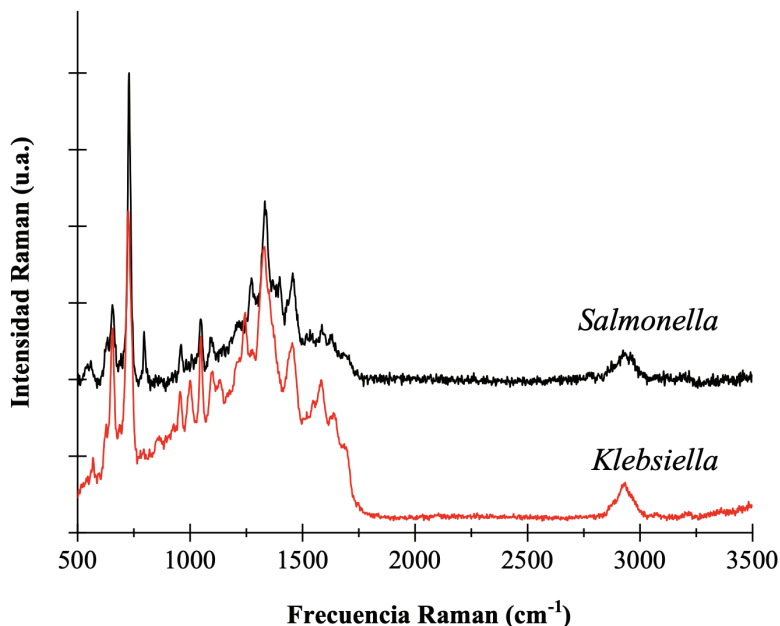


Figura 8. Espectro Raman característico de las frecuencias presentes en las bacterias *Salmonella enterica* y *Klebsiella pneumoniae*.

En el análisis de proteínas, ver figura 9, los picos observados en los rangos asociados a enlaces disulfuro, aminoácidos específicos y vibraciones de amidas confirman la capacidad de la técnica SERS para detectar estructuras moleculares relevantes en biomoléculas [39] [41] [42]. La obtención de estos espectros demuestra la versatilidad de la metodología implementada y su potencial aplicación en estudios de proteínas específicas.

Entre las limitaciones del estudio se encuentra la variabilidad inherente a la distribución de nanopartículas sobre la muestra y la influencia de la fluorescencia en ciertas regiones espectrales. No obstante, los resultados obtenidos evidencian que, mediante una adecuada optimización de los parámetros de síntesis y medición, es posible obtener espectros reproducibles y con suficiente información estructural.

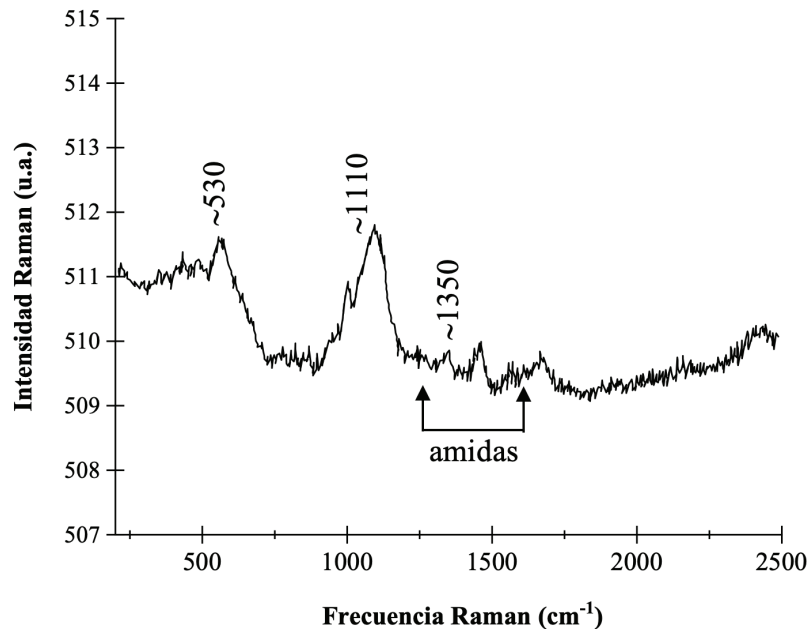


Figura 9. Espectro Raman de la Trombina utilizando AgNP's y un láser de 532 nm.

Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se implementó y verificó la utilidad de un protocolo experimental para la obtención de espectros Raman de bacterias y proteínas mediante la técnica SERS. La identidad de las cepas bacterianas fue confirmada mediante secuenciación del gen ADN_r-16S, lo que permite la identificación biológica de las muestras analizadas.

La síntesis de nanopartículas metálicas de oro y de plata para la implementación de la técnica SERS demostró ser un factor crítico en la calidad de los espectros obtenidos. La síntesis *ex situ*, particularmente a pH 9, permitió obtener señales más definidas y con menor interferencia de fluorescencia en comparación con la síntesis *in situ*. Esto evidencia la importancia del control de las condiciones de síntesis para mejorar la reproducibilidad y la definición de la señal Raman. Asimismo, los tamaños de las nanopartículas se controlaron mejor mediante la síntesis *ex situ*, lo que a su vez resultó ser más conveniente en el análisis de bacterias mediante SERS.

Los espectros bacterianos mostraron picos característicos asociados a proteínas, ácidos nucleicos y componentes estructurales de la membrana celular. Aunque las tres especies bacterianas presentan similitudes en la región espectral 600–1500 cm⁻¹, el perfil global permitió diferenciarlas mediante la intensidad relativa de los picos.

En el caso de las proteínas, la técnica permitió identificar vibraciones asociadas a enlaces disulfuro y modos amida, confirmando la capacidad del método para caracterizar estructuras biomoleculares en medio acuoso.

En conjunto, los resultados confirman que la espectroscopía Raman+SERS constituye una herramienta rápida, reproducible y complementaria a los métodos convencionales de identificación microbiológica. Su implementación abre posibilidades para futuras aplicaciones en diagnóstico, monitoreo estructural y estudios de biomateriales.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC por el apoyo y financiamiento del proyecto, código 1450017. Agradecemos al LANOTEC y al Laboratorio Institucional de Microscopía del TEC, por la colaboración con las imágenes de microscopía electrónica, así como la colaboración del Dr. Juan Teodomiro López Navarrete, Departamento de Químico Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, por sus recomendaciones y sugerencias para la implementación de la técnica de espectroscopía Raman en el TEC. Finalmente, queremos reconocer la colaboración del CEQIATEC y el CIB por brindarnos las cepas de bacterias utilizadas en el estudio y especialmente, al Laboratorio de Espectroscopía Molecular, Imagen y Color (LEMIC) de la Escuela de Física, por facilitar los equipos de algunas de las técnicas y por el equipamiento requerido durante esta investigación.

Referencias

- [1] WHO, WHO's first ever global estimates of foodborne diseases find children under 5 account for almost one third of deaths, 2018.
- [2] Ministerio de Salud, «Sitio oficial Ministerio de Salud,» 2018. [En línea]. Available: https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/servicios-capacitadores-ms/doc_details/758-instalacion-de-funcionamiento-de-instalaciones-tipo-iii.
- [3] K. Boye y D. S. Hansen, «Sequencing of 16S rDNA of Klebsiella: taxonomic relations within the genus and to other Enterobacteriaceae,» *Int J Med Microbiol*, vol. 292, nº Feb, pp. 496-498, 500-501, 2003.
- [4] INCIENSA, «Informe de vigilancia basada en laboratorio: Segundo caso importado de infección por enterobacteria carbapenemasa tipo Metalobetalactamasa New Delhi (MBL-NDM) positiva en Costa Rica,» Ministerio de Salud, Costa Rica, 2014.
- [5] INCIENSA, «Alerta: Confirmación de aislamientos de Klebsiella pneumoniae portadora de carbapenemasa de tipo KPC en cuatro pacientes internados en un hospital nacional de Costa Rica, enero 2016,» Ministerio de Salud, Costa Rica, 2016.
- [6] Y. Cheong, Y. J. Kim, H. Kang, S. Choi y H. J. Lee, «Rapid label-free identification of Klebsiella pneumoniae antibiotic resistant strains by the drop-coating deposition surface-enhanced Raman scattering method,» *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, vol. 183, nº Ag., p. 53, 2017.
- [7] W. T. Fan, T. T. Qin, R. R. Bi, H. Q. Kang, P. Ma y B. Gu, «Performance of the matrix-assisted laser desorption ionization time-of-flight mass spectrometry system for rapid identification of streptococci: a review,» *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*, vol. 36, nº 6, pp. 1005-1006, Jun 2017.
- [8] W. Gao, B. Li, R. Yao, Z. Li, X. Wang, X. Dong, H. Qu, Q. Li, N. Li, H. Chi, B. Zhou y Z. Xia, «Intuitive Label-Free SERS Detection of Bacteria Using Aptamer-Based in Situ Ag Nanoparticles Synthesis,» *Anal. Chem.*, vol. 89, nº 18, Sep 2017.
- [9] J. Li, C. Wang, H. Kang, L. Shao, L. Hu, R. Xiao, S. Wang y B. Gu, «Label-free identification carbapenem-resistant Escherichia coli based on surface-enhanced resonance Raman scattering,» *RSC Adv*, vol. 8, nº 9, p. 4761, 2018.
- [10] G. Dubourg, B. Lamy y R. Ruimy, «Rapid phenotypic methods to improve the diagnosis of bacterial bloodstream: meeting the challenge to reduce the time to result,» *Clinical Microbiology and Infection*, vol. 24, nº 9, 2018.
- [11] C. Wang, J. Wang, M. Li, X. Qu, K. Zhang, Z. Rong, R. Xiao y S. Wang, «A rapid SERS method for label-free bacteria detection using polyethylenimine-modified Au-coated magnetic microspheres and Au@Ag nanoparticles,» *Analyst*, vol. 141, nº 22, pp. 6226-6238, 2016.
- [12] Y. Liu, H. Zhou, Z. Hu, G. Yu, D. Yang y J. Zhao, «Label and label-free based surface-enhanced Raman scattering for pathogen bacteria detection: A review,» *Biosens Bioelectron*, vol. 94, nº 131, pp. 131-140, Ag 2017.
- [13] N. E. Dina, H. Zhou, A. Colnita, N. Leopold, T. Szoke-Nagy, C. Coman y C. Haisch, «Rapid single-cell detection and identification of pathogens by using surface-enhanced Raman spectroscopy,» *Analyst*, vol. 142, nº 10, May 2017.
- [14] C. Wang y C. Yu, «Analytical characterization using surface-enhanced raman scattering (SERS) and microfluidic sampling,» *Nanotechnology*, vol. 26, nº 9, 2015.

- [15] W. R. Premasiri, D. T. K. Moir, N. Kreiger, G. 2. Jones y L. D. Ziegler, «Characterization of the Surface Enhanced Raman Scattering (SERS) of Bacteria,» *J Phys Chem B*, vol. 109, nº 1, pp. 312-313, 319, 2005.
- [16] H. Zhou, D. Yang, N. P. Ivleva, N. E. Mircescu, R. Niessner y C. Haisch, «SERS Detection of Bacteria in Water by In Situ Coating with Ag Nanoparticles,» *Anal Chem*, vol. 86, nº 3, pp. 1529-1530, 2014.
- [17] M. Shi, J. Zheng, Y. Tan, G. Tan, J. Li, Y. Li, X. Li, Z. Zhou y R. Yang, «Ultrasensitive detection of single nucleotide polymorphism in human mitochondrial DNA utilizing ion-mediated cascade Surface Enhanced Raman Spectroscopy amplification,» *Anal Chem*, vol. 87, nº 5, pp. 2734-2740, 2015.
- [18] Y. Wan, Z. Guo, X. Jiang, K. Fang, X. Lu, Y. Zhang y N. Gu, «Quasi-spherical silver nanoparticles: Aqueous synthesis and size control by the seed-mediated Lee–Meisel method,» *J Colloid Interface Sci*, vol. 394, pp. 263-264, 2013.
- [19] P. C. Lee y D. Meisel, «Adsorption and Surface-Enhanced Raman of Dyes on Silver and Gold Sols,» *Journal of Physical Chemistry*, vol. 86, pp. 3391-3395, 1982.
- [20] S. Panikkanvalapil, M. A. Mohamoud, M. A. Mackey y E. S. M. A., «Surface-Enhanced Raman Spectroscopy for RealTime Monitoring of Reactive Oxygen Species-Induced DNA Damage and Its Prevention by Platinum Nanoparticles,» *ACS Nano*, vol. 7, nº 9, pp. 7524-7526, 2013.
- [21] S. Sutton, «The Gram Stain,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.microbiol.org/resources/monographswhite-papers/the-gram-stain/>.
- [22] Promega Coporation, «Wizard (R) Genomic DNA Purification Kit. Technical Manual,» Promega, Madison WI, USA, 2023.
- [23] M. Govindarajan, S. Kwon y H. Weon, «Isolation, molecular characterization and growthpromoting activities of endophytic sugarcane diazotroph klebsiella sp. GR9,» *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 23, nº 7, p. 999 y 1003, 2007.
- [24] E. Gilbert, F. Yucebay, M. Malczynski, D. Smith, J. Esterly, C. Qi, M. Postelnick y M. McLaughlin, «Use of Organism Identification by 16S Ribosomal RNA Polymerase Chain Reaction to Shorten Antimicrobial Length of Therapy,» *Diagnostic Microbiology and Infectious Disease*, vol. 88, nº 2, pp. 2,3,6 y 7, 2017.
- [25] R. Kuncham, T. Sivaprakasam, P. Kumar, P. Sreenath, R. Nayak, T. Thayumanayan y G. Subba, «Bacterial fauna associating with chironomid larvae from lakes of Bengaluru city, India - A 16s rRNA gene based identification,» *Genomics Data*, vol. 12, p. 46, 2017.
- [26] N. E. Biolabs, «PCR Protocol for Taq DNA Polymerase with Standard Taq Buffer (M0273),» 2017. [En línea]. Available: : <https://www.neb.com/protocols/1/01/01/taq-dna-polymerase-with-standard-taq-buffer-m0273>.
- [27] European Informatics Institute, «Clustal Omega Multiple Sequence Alignment,» 2018.
- [28] National Center of Biotechnology Information, «Basic Local Alignment Search Tool».
- [29] R. S. Hellberg, C. J. Haney, Y. Shen, C.-M. Cheng, D. M. Williams-Hill y W. B. Martin, «Development of a custom 16S rRNA gene library for the identification and molecular subtyping of Salmonella enterica,» *J Microbiol Methods*, vol. 91, pp. 448-449, 459, 2012.
- [30] B. Yang, Y. Wang y P.-Y. Qian, «Sensitivity and correlation of hypervariable regions in 16S rRNA genes in phylogenetic analysis,» *BMC Bioinformatics*, vol. 17, nº 135, p. 3, 2016.
- [31] S. D. Solomon, M. Bahadory, A. V. Jeyarajasingam, S. A. Rutkowsky y C. Boritz, «Synthesis and Study of Silver Nanoparticles,» *Journal of Chemical education*, vol. 84, nº 2, pp. 322-325, 2007.
- [32] K. C. Song, S. M. Lee, T. S. Park y B. S. Lee, «Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method,» *Korean Journal Chemistry Engineering*, vol. 26, nº 1, pp. 153-155, 2009.
- [33] H. Guo, B. Xing, L. C. Hamlet, A. Chica y L. He, «Surface-enhanced Raman scattering detection of silver nanoparticles in environmental and biological samples,» *Science of the Total Environment*, pp. 246-252, 2016.
- [34] V. Ciobota, E. M. Burkhardt, W. Schumacher, P. Rösch, K. Küsel y J. Popp, «The influence of intracellular storage material on bacterial identification by means of Raman spectroscopy,» *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 397, pp. 2929-2937, 2010.
- [35] W. Huang, M. Li, R. M. Jarvis, R. Goodacre y S. A. Banwart, «Shining lighth on the microbial world: The application of Raman microspectroscopy,» *Advance Applied Microbiology*, vol. 70, pp. 153-186, 2010.
- [36] X. Lu, H. Al-Qadiri, M. Lin y B. Rasco, «Application of Mid-infrared and Raman Spectroscopy to the Study of Bacteria,» *Food and Bioprocess Technology*, vol. 4, pp. 919-935, 2011.
- [37] R. M. Jarvis y R. Goodacre, «Characterisation and identification of bacteria using SERS,» *The Royal Society of Chemistry*, vol. 37, pp. 931-936, 2008.

- [38] A. Sengupta, M. Mujacic y E. J. Davis, «Detection of bacteria by surface-enhanced Raman spectroscopy,» *Anal Bioanal Chem*, vol. 386, pp. 1379-1386, 2006.
- [39] J. Sundaram, B. Park, A. Hinton, K. Lawrence y Y. Kwon, «Detection and differentiation of salmonella serotypes using surface enhanced Raman scattering (SERS) technique,» *Food Measure*, vol. 7, pp. 1-12, 2013.
- [40] H. M. Al-Qadiri , M. Lin, A. Cavinato y B. Rasco, «Fourier transform infrared spectroscopy, detection and identification of Escherichia coli O157:H7 and Alicyclobacillus strains in apple juice.,» *International Journal of Food Microbiology*, vol. 111, n° 1, pp. 73-80, 2006.
- [41] T. Yang, X. Li y J. Lin, «Spectral analysis of human saliva for detection of lung cancer using surface-enhanced Raman spectroscopy,» *J Biomed Optics*, 2012.
- [42] K. Virkler y I. Lednev, «Raman spectroscopic signature of blood and its potential application to forensic body fluid identification,» *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, pp. 525-534, 2009.
- [43] K. M. Hamasha, *Raman Spectroscopy for the Microbiological Characterization and Identification of Medically Relevant Bacteria*, Wayne State University Detroit, MI, 2011, pp. 41-46 and 82.
- [44] M. Kahraman, M. M. Yazici, F. Sahin, O. Bayrak y M. Culha, «Reproducible Surface-Enhanced Raman Scattering Spectra of Bacteria on Aggregated Silver Nanoparticles,» *Applied Spectroscopy*, vol. 61, n° 5, pp. 479-485, 2007.
- [45] R. X. He, R. Liang, P. Peng y Y. N. Zhou, «Effect of the size of silver nanoparticles on SERS signal enhancement,» *J Nanopart Res*, vol. 19, n° 267, 2017.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Para la revisión gramatical y ortográfica de este artículo, empleamos la herramienta de IA *ChatGPT*. Esta nos permitió identificar errores y mejorar la fluidez del texto. No obstante, realizamos una revisión final para garantizar que el artículo cumpliera con los estándares de calidad de la revista. Además, utilizamos la misma herramienta de IA para traducir el resumen de este artículo del español al inglés. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones.

Fitohormonas y su impacto en la adaptación de las plantas al estrés salino: un artículo de revisión

Phytohormones and their impact on plant adaptation to salt stress: a review article

Kharen Liliana Marengo-Cardona¹, Sara Lucia Romano-Peréz², Jovanna Acero-Godoy³


Fecha de recepción: 20 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 3 de octubre, 2025


Marengo-Cardona, K. L.; Romano-Peréz, S.L.; Acero-Godoy, J. Fitohormonas y su impacto en la adaptación de las plantas al estrés salino: un artículo de revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 37-53.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7994>




1 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia.

 kmarengo@universidadmayor.edu.co


 <https://orcid.org/0009-0008-6952-3236>


2 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia.

 sromano@universidadmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0007-5371-6335>

3 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Facultad de Ciencias de la Salud. Bogotá, Colombia.

 jacerog@universidadmayor.edu.co

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

Palabras clave

Suelo; fitohormonas; salinidad; resistencia; estrés abiótico; plantas (cultivos).

Resumen

La salinidad del suelo representa una limitación crítica para la producción agrícola a nivel mundial, afectando el crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas. Ante este tipo de estrés, las plantas ponen en marcha una serie de respuestas fisiológicas, bioquímicas y moleculares que les permiten adaptarse. Entre los principales reguladores de estas respuestas se encuentran las fitohormonas, como el ácido abscísico (ABA), el etileno y las auxinas, las cuales desempeñan funciones esenciales en la tolerancia a condiciones salinas. El ABA contribuye al cierre estomático y regula la expresión de genes vinculados al estrés hídrico y salino. Por su parte, el etileno, aunque tradicionalmente asociado con procesos de senescencia, también participa en la regulación de la homeostasis iónica y en la activación de mecanismos antioxidantes en plantas tolerantes. Las auxinas, en tanto, promueven el desarrollo del sistema radicular y favorecen la relación con microorganismos benéficos, facilitando una mejor absorción de agua y nutrientes. Esta revisión analiza la interacción y señalización de estas fitohormonas en entornos de salinidad, subrayando la relevancia de comprender estos procesos para impulsar el desarrollo de estrategias biotecnológicas orientadas a mejorar la tolerancia de los cultivos en suelos salinos.

Keywords

Soil; phytohormones; salinity; resistance; abiotic stress; plants (crops).

Abstract

Soil salinity represents a critical constraint on agricultural production worldwide, affecting plant growth, development, and yield. Faced with this type of stress, plants trigger a series of physiological, biochemical, and molecular responses that allow them to adapt. Among the main regulators of these responses are phytohormones, such as abscisic acid (ABA), ethylene, and auxins, which play essential roles in tolerance to saline conditions. ABA contributes to stomatal closure and regulates the expression of genes linked to water and salt stress. Ethylene, meanwhile, although traditionally associated with senescence processes, also participates in the regulation of ionic homeostasis and the activation of antioxidant mechanisms in tolerant plants. Auxins, meanwhile, promote the development of the root system and foster relationships with beneficial microorganisms, facilitating improved water and nutrient absorption. This review analyzes the interaction and signaling of these phytohormones in saline environments, highlighting the importance of understanding these processes to promote the development of biotechnological strategies aimed at improving crop tolerance in saline soils.

Introducción

La salinidad del suelo es uno de los principales desafíos que enfrenta la agricultura moderna, ya que afecta negativamente el desarrollo, crecimiento y productividad de los cultivos. En Colombia, se ha estimado que aproximadamente el 10 % del territorio presenta niveles de salinidad moderados a altos. Aunque este problema ha estado presente desde hace tiempo, en los últimos años se ha intensificado como consecuencia del cambio climático, agravando aún más sus efectos sobre los sistemas agrícolas [1]. El aumento de las temperaturas, los cambios

en las lluvias y prácticas agrícolas inadecuadas, como el uso excesivo de aguas salinas para riego, de fertilizantes y la erosión del suelo, han contribuido al deterioro progresivo de la calidad edáfica en múltiples regiones [2].

La acumulación de sales no solo altera las propiedades fisicoquímicas del suelo (afectando su estructura y reduciendo su porosidad y permeabilidad), sino que también compromete directamente procesos fisiológicos clave en las plantas, desde la germinación hasta la fotosíntesis. Estas condiciones generan estrés osmótico, ya que dificultan la absorción de agua por parte de las raíces, lo que provoca una sequía fisiológica que es posible observar en el marchitamiento, la caída de hojas y el deterioro general de los cultivos [3]. Además, el exceso de algunos iones como sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) causa estrés iónico, que interfiere en la absorción de nutrientes esenciales como potasio o calcio, y favoreciendo la deficiencia de nitrógeno, que reduce la producción de clorofila. La sensibilidad al estrés salino puede variar según la especie, siendo las fases de germinación y crecimiento temprano las más vulnerables a esta afectación [4].

En este contexto, las fitohormonas cumplen un rol esencial en la regulación del crecimiento y en la adaptación de las plantas al estrés salino. Estas moléculas hormonales no sólo modulan la respuesta frente al estrés, sino que también intervienen en procesos como la osmorregulación, la tolerancia a la deshidratación y la optimización de la absorción de nutrientes [5]. El ácido abscísico (ABA), por ejemplo, actúa como un regulador clave al inducir el cierre estomático, reduciendo la pérdida de agua por transpiración. Por otro lado, hormonas como las auxinas y el etileno desempeñan funciones críticas en la arquitectura radicular, promoviendo un desarrollo que favorece la exploración del suelo y la captación eficiente de recursos en ambientes salinos [6].

Comprender el papel que desempeñan las fitohormonas en la respuesta vegetal ante condiciones de alta salinidad, es clave para profundizar en los mecanismos moleculares que regulan la tolerancia al estrés. Este conocimiento resulta esencial para el desarrollo de estrategias agrícolas más sostenibles, especialmente en contextos donde la salinización del suelo compromete la productividad. A través de la manipulación de estas rutas hormonales, es posible desarrollar enfoques biotecnológicos que permitan una producción agrícola más eficiente en suelos afectados por la salinidad, contribuyendo a la seguridad alimentaria en escenarios cada vez más exigentes [7].

Estrés biótico y abiótico en plantas: mecanismos de respuesta y adaptación

El estrés generado por factores bióticos y abióticos influye significativamente en las plantas. Comprender cómo responden a estos estímulos es clave para asegurar su supervivencia en ambientes dinámicos y exigentes, especialmente en el contexto del calentamiento global. Este fenómeno ha intensificado y hecho más frecuentes eventos extremos como sequías prolongadas, altas temperaturas y lluvias intensas, lo que representa un reto para la agricultura y la conservación de los ecosistemas naturales [8].

El estrés biótico es causado por organismos vivos que afectan negativamente el crecimiento y desarrollo de las plantas. Estos agentes, comúnmente conocidos como plagas agrícolas, incluyen insectos, ácaros, moluscos, aves, roedores. Asimismo, patógenos como virus, bacterias, hongos y nematodos. Su impacto puede manifestarse a través del consumo directo de tejido vegetal, la transmisión de enfermedades o la interferencia en algunos procesos fisiológicos [9]. Frente a estas amenazas, las plantas responden mediante defensas genéticamente programadas, conocidas como respuesta inmunológica innata, que involucran

cientos de genes de resistencia. Por ejemplo, el gen *RPS2* en *Arabidopsis thaliana* se activa frente a la infección de *Pseudomonas syringae* con presencia del gen *avrRpt2*, bacteria que puede provocar pudrición floral e inhibir el crecimiento mediante toxinas [10].

Este tipo de estrés también puede afectar la fotosíntesis, como ocurre con los daños foliares por insectos o infecciones virales. Las respuestas de las plantas pueden ser elásticas (reversibles), refiriéndose a la producción de metabolitos secundarios (como flavonoides, alcaloides), aumento de fitohormonas como ABA o etileno y la activación de genes de resistencia [11]; como también plásticas (irreversibles) que incluyen cambios morfológicos como lo son, el engrosamiento de la cutícula, la formación de tricomas (pelos epidérmicos que actúan como barreras físicas), o la lignificación de paredes celulares para dificultar la penetración de patógenos [12][13]. A nivel bioquímico, pueden producirse acumulaciones permanentes de compuestos fenólicos, depósitos de callosa o alteraciones en la arquitectura foliar, reduciendo el área de exposición al ataque. Estos cambios representan una inversión energética considerable, pero son fundamentales para la supervivencia en entornos hostiles [14].

Por otro lado, el estrés abiótico se refiere a condiciones ambientales desfavorables que reducen el rendimiento vegetal cuando factores como temperatura, nutrientes, viento, radiación o salinidad exceden los rangos óptimos. El estrés salino, por ejemplo, implica acumulación excesiva de sales en el agua o suelo, dificultando la absorción de nutrientes y afectando el crecimiento, desarrollo y productividad [8].

El estrés abiótico en las plantas se clasifica principalmente en osmótico e iónico (Figura 1). El estrés osmótico (Figura 1a) surge por una menor disponibilidad de agua, como en suelos secos, lo que deshidrata las células y limita la fotosíntesis. Ante esto, las plantas cierran sus estomas para reducir la pérdida de agua, aunque también restringen la entrada de CO_2 , lo que puede provocar marchitez [6] [15].

En cambio, el estrés iónico (Figura 1b) se debe a la acumulación de iones tóxicos como sodio (Na^+) y cloro (Cl^-), derivada de factores como el riego con agua salina, el uso excesivo de agroquímicos o condiciones como sequía y altas temperaturas. Estos iones generan toxicidad celular, dañando proteínas y membranas [6].

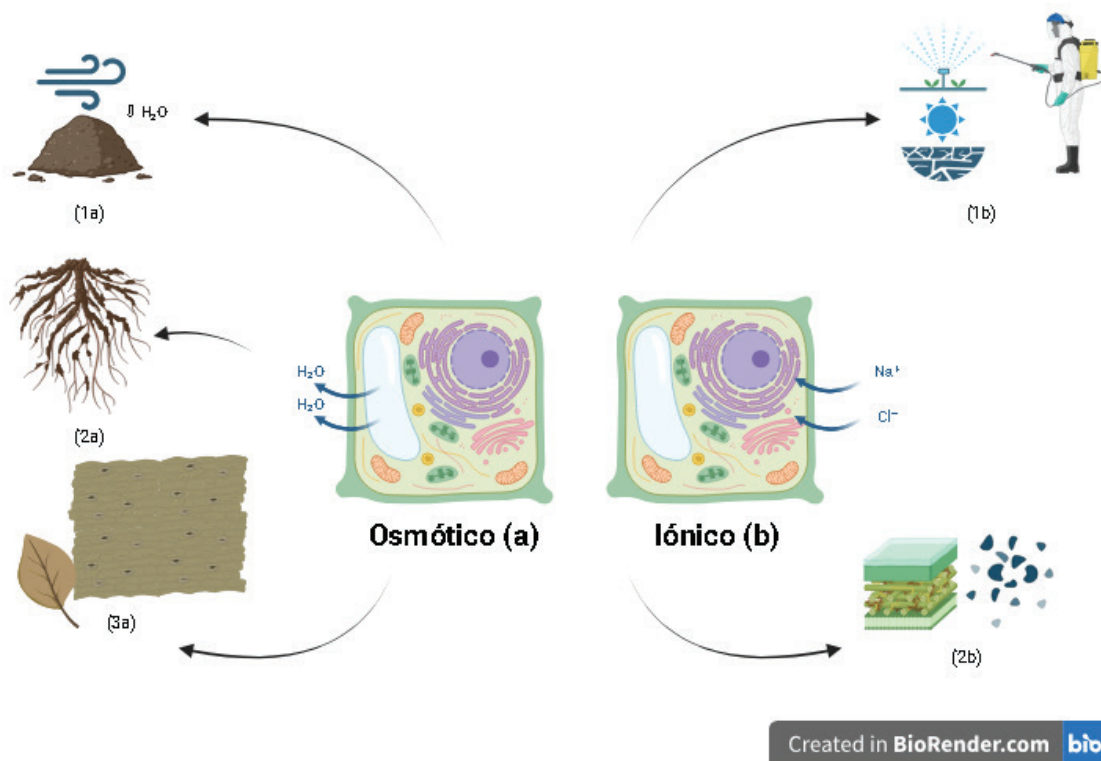


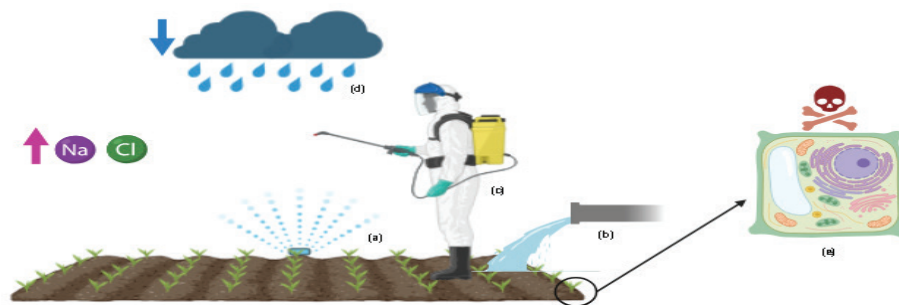
Figura 1. Subtipos estrés abiótico. Estrés osmótico (a): Disminución de agua (1a), deshidratación celular y baja absorción en raíces (2a), cierre estomático (3a). Estrés iónico (b): Factores (1b), toxicidad iónica y daño celular (2b). Adaptado de: [6].

Al igual que ante el estrés biótico, las plantas activan respuestas inmediatas como el cierre estomático (mediado por ácido abscísico) que puede ocurrir en menos de una hora [16], y respuestas a largo plazo como modificaciones morfológicas en raíces y hojas que permiten a la planta mejorar su tolerancia sostenida al estrés ambiental [17].

¿Cómo se llega al estrés salino?

El estrés salino en plantas se manifiesta cuando el suelo presenta concentraciones elevadas de sales solubles, particularmente cloruro de sodio (NaCl), sulfato de calcio (CaSO₄), así como otros sulfatos y cloruros de cationes como Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺, derivados de metales alcalinos y alcalinotérreos con potencial citotóxico [1]. La salinización puede originarse por prácticas agrícolas inadecuadas, como el uso de agua de riego con alto contenido de sales, la aplicación excesiva de fertilizantes, la infiltración de agua marina en regiones costeras o por condiciones de baja precipitación que impiden el arrastre de las sales fuera del suelo [3].

Cuando las plantas absorben agua de estos suelos, las sales entran junto con el agua y se acumulan en sus tejidos (Figura 2). Esto provoca un desequilibrio osmótico, donde el agua sale de las células para tratar de equilibrar la concentración de sales, causando deshidratación celular. Con el tiempo, esta condición altera funciones vitales como la fotosíntesis, el metabolismo y el crecimiento. En situaciones más extremas, el daño celular puede ser irreversible, afectando la producción y la supervivencia de la planta en ambientes salinos [18].



Created in [BioRender.com](https://www.biorender.com) 

Figura 2. Esquema de salinización del suelo. (a) Riego con agua salina, (b) infiltración marina en suelos costeros, (c) aplicación fertilizantes salinos, (d) acumulación de sales en suelos áridos, y (e) desecación y muerte celular. Adaptado de: [3].

Metodología

Para la elaboración del presente artículo de revisión se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos como SciELO, IntechOpen, Frontiers, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) y la Revista Mexicana de Ciencias Forestales, así como en artículos de divulgación y trabajos de grado. Para la selección inicial de fuentes, se emplearon términos y frases clave como «hormonas vegetales», «fitohormonas», «principales fitohormonas», «ácido abscísico (ABA)», «etileno», «auxinas», «tipos de estrés», «estrés salino», «plantas», «suelo», «señalización» y «mecanismos de acción». La búsqueda se realizó en un período comprendido entre el año 2004 al año 2025, considerando artículos en español e inglés.

Los criterios de inclusión fueron: artículos originales, revisiones y trabajos de grado que abordaron los temas mencionados, publicados en revistas científicas y/o instituciones educativas, y que presentarán información relevante sobre hormonas vegetales, estrés salino y sus mecanismos de acción. Se excluyeron fuentes que no fueran pertinentes y que no estuvieran disponibles en texto completo.

Posteriormente, se registraron datos como el nombre del artículo, resumen, fecha de publicación, idioma, enlace y DOI en una base de datos propia, creada en la herramienta “Hoja de cálculo de Google”, con el fin de facilitar la organización y análisis de la información recopilada.

Resultados

Impacto de la salinidad en el suelo y su papel en el estrés salino

La relación entre la salinidad del suelo y el estrés en las plantas ha cobrado gran relevancia en la agricultura, ya que influye directamente en el rendimiento de los cultivos y en el equilibrio de los ecosistemas. El aumento de la salinización se debe a prácticas de riego inadecuadas, la expansión urbana y los efectos del cambio climático. Por ello, es fundamental entender cómo las altas concentraciones de sales afectan el desarrollo vegetal para así diseñar estrategias de manejo que fortalezcan la tolerancia de los cultivos y protejan el medio ambiente [19].

Además, el impacto de la salinidad varía según la especie vegetal (Cuadro 1), por lo que se han propuesto clasificaciones de tolerancia basadas en la reducción del rendimiento en suelos salinos en comparación con suelos no salinos.

Cuadro 1. Clasificación de la salinidad del suelo y sus efectos sobre los cultivos.

Clase de salinidad del suelo	Conductividad del extracto de saturación (dS/m)	Efecto sobre las plantas de cultivo	Ejemplos de cultivos tolerantes
No salino	0 - 2	Efectos insignificantes sobre la mayoría de cultivos.	Desarrollo óptimo de la mayoría de los cultivos agrícolas.
Ligeramente salino	2 - 4	Posible reducción de rendimiento en cultivos sensibles.	Frijol, maíz, guisante, soya y trébol.
Moderadamente salino	4 - 8	Reducción significativa en el rendimiento de muchos cultivos.	Canola, avena, trigo, centeno, cebada y alfalfa.
Fuertemente salino	8 - 16	Sólo los cultivos tolerantes presentan rendimientos aceptables.	Algunas especies de <i>Agropyron</i> .
Muy fuertemente salino	> 16	Solo algunos cultivos altamente tolerantes sobreviven.	Algunas gramíneas forrajeras.

Adaptado de: [20]

Tipos de suelos salinos

Los suelos salinos son aquellos que presentan altas concentraciones de sales solubles, como cloruros (por ejemplo: cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl₂) y cloruro de magnesio (MgCl₂)); sulfatos (como sulfato de sodio, Na₂SO₄; sulfato de calcio, CaSO₄; sulfato de magnesio, MgSO₄); carbonatos (como carbonato de sodio, Na₂CO₃; carbonato de calcio, CaCO₃; carbonato de magnesio, MgCO₃); además de bicarbonatos (HCO₃⁻), nitratos (NO₃⁻) y, en menor proporción, sales de potasio y amonio [21].

Estas sales pueden acumularse en la superficie o en capas más profundas del suelo debido a procesos naturales o actividades humanas, como el riego inadecuado que incluye prácticas como el uso de agua con alto contenido de sales, la falta de drenaje eficiente, la ausencia de lavados periódicos del suelo y el diseño deficiente de sistemas de riego [3]. La presencia excesiva de sales dificulta que las plantas absorban agua y nutrientes, afectando su crecimiento y procesos esenciales como la fotosíntesis y el desarrollo de las raíces. Este tipo de suelo es más frecuente en regiones áridas y semiáridas (Cuadro 2), donde la poca lluvia y la alta evaporación favorecen la acumulación de sales [22].

Para diagnosticar y manejar estos suelos, se utilizan indicadores como la conductividad eléctrica (CE), que mide la concentración de sales solubles; la relación de absorción de sodio (RAS), que evalúa el riesgo de sodicidad y su impacto en la estructura del suelo; y el pH, que, cuando es elevado, puede reducir la disponibilidad de nutrientes esenciales. Estos parámetros son fundamentales para implementar estrategias de manejo adecuadas y mitigar los efectos

adversos de la salinidad en la agricultura [22]. Estos suelos representan un desafío significativo para la agricultura, ya que la salinidad puede reducir la absorción radicular y aumentar el estrés osmótico, afectando la salud de las plantas [23].

Cuadro 2. Clasificación de los tipos de suelo.

Característica	Suelo Salino	Suelo Sódico	Suelo Salino-Sódico
Definición	Suelo con alta concentración de sales solubles.	Suelo con alta concentración de sodio intercambiable.	Suelo con alta concentración de sales solubles y sodio intercambiable.
Ejemplos de Sales	NaCl, Na ₂ SO ₄ , Calcio y magnesio	Principalmente Na ⁺	Mezcla de sales como NaCl y Na ₂ SO ₄
Conductividad Eléctrica (CE)	> 4 dS/m	Variable	> 4 dS/m
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	< 13	> 13	> 13
pH	< 8.5	> 8.5	Variable, pero puede ser > 8.5
Suelos típicos de presencia	Común en desiertos, valles secos, y llanuras aluviales donde la evaporación excede la precipitación, provocan la acumulación de sales.	Común en llanuras y regiones áridas donde la lixiviación de sodio es limitada y la acumulación de sodio es alta.	Común en llanuras y regiones áridas donde hay una acumulación tanto de sales solubles como de sodio debido a la escasa lixiviación.

Adaptado de: [22]

Clasificación de plantas según su adaptación a ambientes salinos: estrategias y mecanismos de tolerancia

Comprender y clasificar cómo las plantas se adaptan a entornos salinos permite reconocer las estrategias y mecanismos que emplean para resistir la salinidad, ofreciendo información valiosa para mejorar el manejo de los cultivos y restaurar ecosistemas afectados. Las plantas halófitas se caracterizan por su capacidad para crecer y desarrollarse en suelos con altas concentraciones de sal sin verse perjudicadas. Estas especies suelen habitar en regiones cálidas y secas y pueden clasificarse en distintos subgrupos (Cuadro 3). En contraste, las plantas glicófitas (que incluyen la mayoría de los cultivos agrícolas) no toleran altos niveles de sal y prefieren suelos con baja salinidad. También existen las pseudohalófitas, que parecen estar adaptadas a ambientes salinos, pero en realidad solo soportan la salinidad de manera parcial y no poseen una resistencia completa [24].

Cuadro 3. Subclasificación de plantas halófitas.

Clasificación	Definición	Características	Ejemplos
Crinohalófitas	Plantas que crecen en ambientes altamente salinos, como estuarios y salares, desempeñan un papel crucial en la estabilización de suelos y la protección de las costas.	Cuentan con glándulas excretoras en los tricomas o la epidermis de las hojas para eliminar el exceso de sal. Tienen raíces profundas que les permiten acceder a agua dulce, clave para mantener el equilibrio hídrico en su entorno salino. Además, sus hojas suculentas almacenan agua, reduciendo la transpiración y minimizando la pérdida de agua, lo que les ayuda a sobrevivir.	<i>Atriplex spongiosa</i> , <i>Limonium</i> , <i>Tamarix</i>
Euhalófitos	Plantas que crecen en ambientes salinos y tienen adaptaciones para tolerar la sal, pero no la requieren para su desarrollo.	Han desarrollado mecanismos para tolerar altas concentraciones de sal, como acumular sales en vacuolas celulares y utilizar sistemas de transporte de iones, como canales, bombas y transportadores en las membranas celulares de raíces, tallos y hojas. También producen compuestos osmoprotectores y desarrollan estructuras especiales como tricomas y una cutícula gruesa para reducir la pérdida de agua y protegerse contra la sal.	<i>Arthrocnemum</i> , <i>Salicornia</i> , <i>Sarcocornia</i>
Glicohalófitos	Están adaptadas a ambientes con salinidad moderada y emplean mecanismos fisiológicos para tolerar el exceso de sal sin depender de condiciones extremadamente salinas. Requieren agua dulce para crecer y desarrollarse óptimamente, por lo que desarrollan raíces profundas para acceder a ella y mantener su equilibrio hídrico.	Tienen adaptaciones para tolerar ciertos niveles de sal, como excreción de sales a través de glándulas salinas en tricomas o epidermis, acumulación de sales en vacuolas de células de tejidos como la epidermis y el mesófilo, y producción de compuestos osmoprotectores como prolina, betaína, sacarosa, rafinosa, manitol y sorbitol.	<i>Chenopodium quinoa</i> , <i>Salsola kali</i> , <i>Suaeda maritima</i>
Locahalófitas	Plantas adaptadas a ambientes con salinidad moderada, que requieren cierto nivel de sales para su crecimiento, aunque no dependen de concentraciones salinas extremas.	Regulan la concentración de sal mediante estructuras especializadas que facilitan el movimiento de las sales, como glándulas excretoras o sistemas de transporte de iones, para mantener un equilibrio osmótico adecuado. En su mayoría, prefieren suelos con niveles bajos de salinidad y tienen mecanismos limitados para manejar la sal en concentraciones más altas.	<i>Atriplex halimus</i> , <i>Salsola oppositifolia</i> , <i>Halimione portulacoides</i>

Adaptado de: [24].

Principales fitohormonas frente al estrés salino

Las plantas reaccionan al estrés salino a través de una serie de adaptaciones fisiológicas, bioquímicas y moleculares, reguladas por una red compleja de interacciones hormonales [25]. Las fitohormonas, también llamadas hormonas vegetales, son compuestos orgánicos esenciales que controlan varios procesos vitales en las plantas. Estas moléculas desempeñan un papel crucial en la coordinación y regulación de funciones a nivel celular, de tejidos y órganos, ayudando al crecimiento, la adaptación y la respuesta a los cambios en el entorno [26].

A diferencia de las hormonas animales, que se producen en glándulas especializadas y actúan sobre células concretas, las fitohormonas se generan en distintas partes de la planta, como los ápices meristemáticos, que impulsan el crecimiento continuo, y los primordios, que intervienen en la formación de nuevas estructuras. Estas zonas son clave para el desarrollo y la capacidad de adaptación de la planta [26][27].

Los tres principales tipos de fitohormonas (ácido abscísico, etileno y auxinas) presentan diferencias en su estructura (Figura 3), lo que se traduce en funciones específicas dentro de los procesos fisiológicos de la planta.

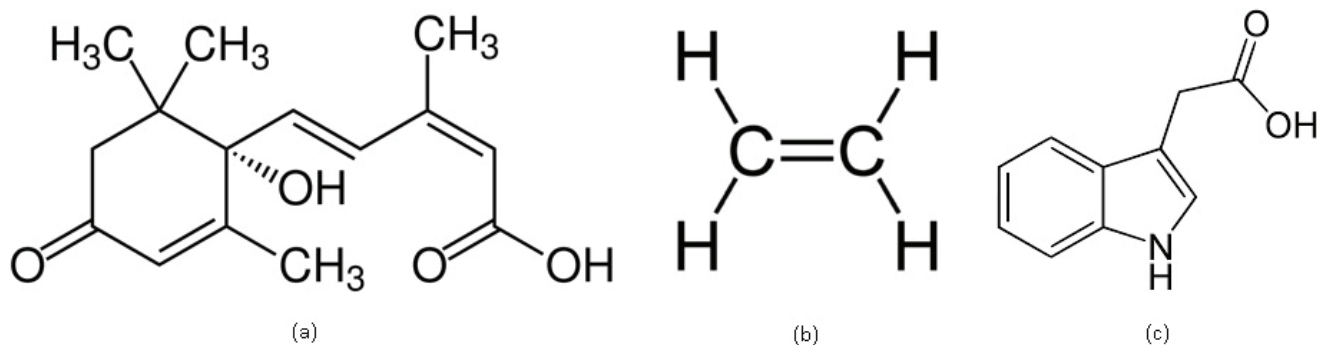


Figura 3. Estructura química fitohormonas. Ácido abscísico (a). Etileno (b). Auxinas (c). Adaptado de: [27]

Ácido Abscísico (ABA)

El ácido abscísico (ABA) es una fitohormona clave que participa en la regulación del cierre de los estomas, la germinación de las semillas y la respuesta a distintos tipos de estrés. Bajo condiciones osmóticas adversas, como la alta salinidad o la sequía, el ABA desencadena respuestas rápidas, como el cierre de los estomas, ayudando a conservar el agua en la planta. Además, esta hormona influye en procesos de adaptación a largo plazo al regular la expresión de genes relacionados con la tolerancia al estrés [28].

Su estructura química está basada en un sesquiterpenoide (terpenos de 15 carbonos), con un anillo central y varios grupos funcionales, incluidos hidroxilos y un grupo carboxilo, lo que le otorga su naturaleza lipofílica (Figura 3a). Esta característica permite al ABA moverse a través de las membranas celulares. Su fórmula molecular es $C_{15}H_{20}O_4$ [29].

El ácido abscísico (ABA) desempeña un papel fundamental en la adaptación de las plantas al estrés salino, especialmente cuando se combina con otros tipos de estrés abiótico, como el calor. En situaciones donde se presentan ambos factores, el ABA actúa como una señal clave en la respuesta de la planta. Estudios realizados en *Arabidopsis thaliana* mostraron que esta combinación de estrés aumenta la vulnerabilidad de las plantas, elevando la proporción de Na^+/K^+ en las hojas y activando genes relacionados con el ABA. Además, plantas modificadas

genéticamente para ser deficientes en ABA mostraron una mayor sensibilidad a este tipo de estrés, lo que subraya la importancia de esta hormona en la regulación de las respuestas adaptativas [30].

Por otra parte, el ABA también controla la expresión de genes como NCED (9-cis-epoxi-caroteno dioxigenasa), involucrados en su producción, y se ha demostrado que su acumulación está estrechamente vinculada a la respuesta ante sequías, deshidratación y estrés por sales. A nivel celular, esta fitohormona regula la apertura de los estomas, ayudando a minimizar la pérdida de agua y mejorando la resistencia a condiciones difíciles. También participa en la respuesta a contaminantes, como los metales pesados, incrementando su concentración en presencia de estos elementos y favoreciendo la tolerancia de las plantas a distintos factores de estrés, como el frío, la sequía y la salinidad [31].

Etileno

El etileno es un hidrocarburo sencillo formado por dos átomos de carbono y cuatro de hidrógeno, unidos por un doble enlace C=C (Figura 3b). A pesar de su estructura molecular sencilla, esta molécula gaseosa actúa como una fitohormona esencial en numerosos procesos fisiológicos de las plantas, incluyendo la maduración de frutos, la senescencia foliar y la respuesta frente a diversos tipos de estrés. Su tamaño reducido no limita su funcionalidad: el etileno cumple un papel determinante en la adaptación y el desarrollo vegetal bajo condiciones adversas. En el contexto del estrés salino, esta hormona participa activamente en la regulación del equilibrio iónico, especialmente de sodio (Na⁺) y potasio (K⁺), además de modular el metabolismo de especies reactivas de oxígeno (ROS) y potenciar la respuesta antioxidante. Asimismo, favorece la asimilación de nutrientes como nitratos y sulfatos, fortaleciendo la resistencia de las plantas en ambientes con alta salinidad. Su fórmula molecular es C₂H₄ [32].

Diversas investigaciones respaldan el papel clave del etileno en la respuesta de las plantas al estrés salino. Un estudio llevado a cabo en 2017 evaluó el comportamiento de cuatro especies de interés agrícola común: pimienta, lechuga, espinaca y remolacha [33]. Tras ser expuestas a un “shock salino” mediante la aplicación de 100 mM de NaCl, se observó que las especies más sensibles al estrés (pimienta y lechuga) presentaron mayores pérdidas de peso fresco y contenido hídrico en comparación con las especies más tolerantes (espinaca y remolacha). Durante la exposición al estrés, todas las especies mostraron un incremento en la tasa respiratoria, así como en la producción de etileno, poliaminas y 1-amino-ciclopropano-1-carboxilato (ACC), este último precursor directo del etileno. Las especies sensibles presentaron niveles más altos y sostenidos de estos compuestos, mientras que las tolerantes lograron volver a valores normales en 24 horas. El aumento de etileno parece estar relacionado con la sensibilidad al estrés, actuando como una señal reguladora en la respuesta de las plantas. Además, se encontró que la producción de poliaminas y etileno ocurre de manera simultánea, sin interferir entre sí, lo que indica que ambas rutas funcionan juntas como parte de la estrategia de adaptación al estrés salino [33].

Auxinas

Las auxinas —entre las que destacan el ácido indol-3-acético (AIA) (Figura 3c), el ácido naftalenoacético (ANA) y el ácido indolbutírico (AIB)— son fitohormonas fundamentales en el crecimiento y desarrollo vegetal. Estas comparten un núcleo indólico como estructura básica, con variaciones en los sustituyentes que les confieren diferencias en actividad y uso agronómico. El AIA, derivado del indol y con fórmula C₁₀H₉NO₂, es esencial para la elongación celular, la formación de raíces y el mantenimiento de la dominancia apical. Por su parte, el ANA —un análogo sintético— se emplea para estimular el enraizamiento y reducir la caída prematura de frutos, mientras que el AIB, de origen natural o sintético, resulta muy eficaz para inducir raíces

adventicias en especies de difícil propagación. Estas hormonas actúan de forma conjunta, regulando procesos esenciales como el transporte de nutrientes y la adaptación a situaciones adversas, y contribuyendo a controlar la acumulación de sodio (Na^+) en suelos salinos, lo que refuerza la tolerancia de las plantas a este estrés [34].

Las auxinas, tanto producidas naturalmente como aplicadas externamente, son clave para ayudar a las plantas a enfrentar el estrés salino. Bacterias como *Methylobacterium oryzae* CBMB20 pueden tolerar altos niveles de sal (200 mM de NaCl) y producir ácido indolacético (AIA), favoreciendo el crecimiento de raíces y mejorando la absorción de agua y nutrientes en ambientes salinos. Además, la aplicación de auxinas, como en *Eucalyptus globulus*, donde el tratamiento con 57 μM de AIA aumentó el enraizamiento 4,7 veces, demuestra cómo estas hormonas apoyan la adaptación y el desarrollo de las plantas bajo condiciones salinas [35].

Proteínas relacionadas con la señalización de fitohormonas y sus mecanismos de acción

Las fitohormonas controlan el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de intrincadas redes de señalización, donde diversas proteínas son esenciales para detectar, transmitir y ejecutar las respuestas hormonales (Cuadro 4). Estas proteínas participan en procesos clave como la germinación, la elongación celular, la floración y la adaptación al estrés, ayudando a las plantas a ajustarse a su entorno y responder a estímulos. Comprender el papel de estas proteínas es crucial para fortalecer la resistencia de las plantas y mejorar su rendimiento en condiciones desfavorables.

En conjunto, las proteínas implicadas en la señalización hormonal actúan como componentes clave para la percepción y transducción del estrés abiótico en las plantas. Su estudio permite comprender cómo las fitohormonas coordinan respuestas complejas que van desde la activación génica hasta cambios metabólicos y estructurales. Esta información resulta fundamental no sólo para fines académicos, sino también para aplicaciones prácticas en el ámbito agrícola, como la selección de cultivos más resilientes y el diseño de estrategias biotecnológicas enfocadas en mejorar la tolerancia a condiciones ambientales adversas [47].

Cuadro 4. Proteínas y su función en los procesos hormonales

Fitohormona	Proteína	Función
Ácido Abscísico (ABA)	Receptores del ABA (PYR/PYL/RCAR)	Estos receptores son proteínas que se unen al ABA. Cuando esto sucede, se inhibe la actividad de las proteínas fosfatasa tipo 2C (PP2C), permitiendo que la señalización continúe [36].
	Fosfatasa tipo 2C (PP2C)	En ausencia de ABA, estas fosfatasa inhiben las proteínas quinasas activadas por ABA (SnRK2). Cuando el ABA se une a su receptor, se inhibe a las PP2C, permitiendo que las SnRK2 se activen [36].
	Proteínas LEA (Late Embryogenesis Abundant)	Aunque no participan directamente en la señalización del ABA, su expresión es inducida por ABA. Estas proteínas ayudan a proteger las células en condiciones de desecación [37].
	Osmotina	Su expresión es estimulada por el ABA, lo que la vincula con la respuesta de la planta a la sequía y la salinidad [38].
Etileno	Proteína insensible al etileno 3 (EIN3) / proteínas similares a EIN3 (EILs)	Es un regulador esencial en la vía de señalización del etileno, ya que activa cascadas transcripcionales al unirse a elementos de respuesta al etileno (PEREs) y secuencias conservadas de unión a EIL (ECBSs) en los promotores de genes diana. Además, juega un papel fundamental en la respuesta a estreses bióticos y abióticos, como la tolerancia a la salinidad, al regular procesos hormonales, la defensa contra patógenos y la adaptación a condiciones adversas [39].
	Factor de Respuesta al Etileno (ERF)	Son un grupo de proteínas de la familia de los factores de transcripción, que regulan genes de desarrollo y defensa en plantas especialmente en respuestas frente a patógenos y herbívoros. En la respuesta defensiva, controlan la síntesis de metabolitos secundarios (p. ej., fitoalexinas) y de proteínas antimicrobianas (quitinasas, glucanasas). Un ejemplo es el gen PR1 (Pathogenesis-Related Protein 1), implicado en la defensa contra patógenos [40].
	Respuesta Triple Constitutiva 1 (CTR1)	Esta proteína es una quinasa citoplasmática que inhibe la señalización del etileno. En ausencia de etileno, mantiene inactiva a EIN2, bloqueando la activación de genes etilénicos. Al unirse el etileno a sus receptores, se inhibe CTR1, permitiendo que EIN2 active EIN3 y se inicien procesos como maduración de frutos, senescencia y respuesta al estrés. En resumen, CTR1 reprime la ruta del etileno para modular la respuesta de la planta según las señales del entorno [41].
	Aminociclopropano-1-carboxilato sintasa (ACS1)	En condiciones de estrés salino, se incrementa la expresión de ACS, lo que eleva la producción de etileno. Este aumento activa la señalización de la fitohormona, estimulando la expresión de genes responsables de la respuesta al estrés, como aquellos que regulan el equilibrio osmótico y la acumulación de antioxidantes. Entre estos se destacan genes que codifican proteínas osmoprotectoras (por ejemplo, P5CS) y antioxidantes (como APX y SOD), que ayudan a mitigar el daño provocado por el estrés salino [42].

Fitohormona	Proteína	Función
Auxinas	Respuesta al Inhibidor del Transporte 1 (TIR1)	<p>Proteína perteneciente a la familia TIR1/AFB, es un receptor esencial de auxinas que modula tanto el crecimiento como la respuesta al estrés en las plantas. Al unirse a auxinas, activa una señalización que desencadena la degradación de proteínas inhibitoras, lo que facilita la expresión de genes involucrados en el desarrollo radicular y la elongación celular.</p> <p>Además, en condiciones de estrés, como el estrés salino, estudios han mostrado que tanto las plantas mutantes como las que sobreexpresan TIR1/AFB mejoran en germinación y desarrollo de raíces, lo que sugiere su papel en la adaptación a ambientes adversos, posiblemente mediante la regulación de enzimas antioxidantes y la modulación de hormonas como el ácido abscísico (ABA), lo que subraya su importancia en la adaptación y resistencia vegetal [43].</p>
	Proteínas PIN-formadas	<p>Las proteínas pertenecientes a la familia PIN-FORMED (PIN), también llamadas transportadores de eflujo de auxina, desempeñan un rol esencial en el transporte polar de esta fitohormona. Estas proteínas, situadas en la membrana celular que permiten su salida del citosol al espacio extracelular.</p> <p>Este proceso unidireccional es crucial para la distribución de auxinas en diferentes órganos vegetales y es fundamental para el desarrollo de raíces, flores, la elongación celular y el establecimiento de patrones morfológicos, respondiendo a señales ambientales e internas [44].</p>
	Factores de respuesta a las auxinas (ARF)	<p>Los factores de transcripción ARF son fundamentales para regular la expresión de genes controlados por auxinas en plantas. Estas proteínas reconocen y se enlazan a secuencias específicas conocidas como AuxRE, ubicadas en las regiones promotoras de genes modulando su actividad ya sea de forma activadora o represora.</p> <p>Su estructura modular incluye un dominio B3 en el extremo N-terminal (DBD) para reconocer AuxRE y regiones intermedias que actúan según su contenido de aminoácidos, como por ejemplo; serina (S) que tiene una función represora y la glutamina (Q) que suele promover la transcripción.</p> <p>Además, intervienen en procesos como la elongación celular y la formación de órganos, y algunos ARF facilitan la dimerización y la interacción con otras proteínas, fortaleciendo su capacidad reguladora [45].</p>
	ARN pequeño inducido por auxina (SAUR)	<p>Las proteínas SAUR desempeñan un papel esencial en la elongación celular inducida por auxinas en las plantas. Actúan mediante la interacción con las H⁺-ATPasa de la membrana plasmática, impidiendo su desfosforilación, lo cual incrementa su actividad. Esto provoca una acidificación del espacio apoplástico, favoreciendo el aflojamiento de la pared celular y facilitando el alargamiento celular.</p> <p>Además, los genes SAUR también participan en respuestas a estímulos lumínicos, regulando la orientación de brotes y ramas según la dirección de la luz. Se ha comprobado que su sobreexpresión promueve el crecimiento celular en distintos órganos vegetales, como tallos, hojas y flores, subrayando su relevancia en el desarrollo morfológico de la planta [46].</p>

Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

El estrés salino es una de las mayores limitaciones para la actividad agrícola, afectando vastas áreas de cultivo y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria global. Según la concentración de sales, las plantas experimentan efectos que varían desde la reducción del crecimiento hasta la inhibición total de la vegetación en condiciones extremas.

La respuesta de las plantas es un proceso activo en el que una compleja red de fitohormonas—especialmente el ácido abscísico (ABA), el etileno y las auxinas—regula el cierre de estomas, la reorganización radicular y la homeostasis osmótica. Estudios recientes indican que, si bien el ABA es clave en la tolerancia a la salinidad, su acción es modulada significativamente por etileno y auxinas. Por ejemplo, la generación de etileno tras un “shock salino” aumenta la tasa respiratoria y la producción de poliaminas, normalizándose rápidamente en especies tolerantes, a diferencia de los cultivos sensibles que sufren una marcada pérdida de biomasa.

Además, las auxinas, junto a la actividad de bacterias promotoras del crecimiento, favorecen el desarrollo radicular, optimizando la captación de agua y nutrientes. Sin embargo, la eficacia de estos mecanismos varía según la especie, el tiempo de exposición y las condiciones ambientales, lo que subraya la necesidad de profundizar en la modulación hormonal para adaptar mejor los cultivos a suelos salinos.

En este contexto, el estudio de las fitohormonas constituye una herramienta prometedora para comprender las respuestas fisiológicas de las plantas expuestas a los ambientes salinos. Este enfoque puede facilitar el desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y resilientes frente a esta problemática. En particular, los agricultores deben considerar estrategias integradas de manejo ambiental que incluyan: la evaluación previa del estado de los suelos antes del establecimiento de cultivos, el uso de técnicas de biorremediación para mitigar la toxicidad y la implementación de cultivos resistentes o bioindicadores que permitan monitorear tempranamente el estrés vegetal. Asimismo, es fundamental promover la capacitación en el manejo seguro y racional de agroquímicos, fomentando alternativas ecológicas y promoviendo la transición hacia sistemas agrícolas más responsables con el entorno.

Referencias

- [1] W. A. Cardona, J. S. Gutiérrez D., O. I. Monsalve C., y C. R. Bonilla C., «Efecto de la salinidad sobre el crecimiento vegetativo de plantas de mora de Castilla (*Rubus glaucus* Benth.) micorrizadas y sin micorrizar», *Rev. Colomb. Cienc. Hortícolas*, vol. 11, n.º 2, pp. 253-266, jul. 2017, doi: 10.17584/rcch.2017v11i2.6109.
- [2] C. Vasyi, «Erosión Del Suelo: Tipos, Cómo Evitarla Y Controlarla», *Erosión Del Suelo: Tipos, Cómo Evitarla Y Controlarla*. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/erosion-del-suelo/>
- [3] C. Vasyi, «Salinidad Del Suelo: Cómo Prevenirla Y Reducirla», *Salinidad Del Suelo: Cómo Prevenirla Y Reducirla*. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/salinidad-del-suelo/>
- [4] K. Pandit, Chandni, S. Kaur, M. Kumar, R. Bhardwaj, y S. Kaur, «Chapter Six - Salinity stress: Impact on plant growth», vol. 9, pp. 145-160, 15 de agosto de 2024.
- [5] L. Rodríguez Pérez, «Implicaciones fisiológicas de la osmorregulación en plantas», vol. 24, n.º 1, 2006, [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v24n1/v24n1a04.pdf>
- [6] A. Martínez Callejón, «Implicaciones de las hormonas vegetales en respuesta al estrés abiótico», Universidad de Jaén, Facultad de Ciencias Experimentales, 2018. [En línea]. Disponible en: https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/8659/1/TFG_Martinez_Callejon_Ana.pdf
- [7] L. Suárez Chávez, A. Álvarez Fonseca, y R. Ramírez Fernández, «Apuntes sobre algunos reguladores del crecimiento vegetal que participan en la respuesta de las plantas frente al estrés abiótico», vol. 33, n.º 3, p. 10, 2012.
- [8] A. Gull, A. Ahmad Lone, y N. Ul Islam Wani, «Biotic and Abiotic Stresses in Plants», en *Abiotic and Biotic Stress in Plants*, IntechOpen, 2019. Accedido: 22 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/66714#>

- [9] «Cómo combatir el estrés biótico en los cultivos». [En línea]. Disponible en: <https://manvert.com/medios/estres-biotico-plantas>
- [10] Z. Chen *et al.*, «Pseudomonas syringae type III effector AvrRpt2 alters Arabidopsis thaliana auxin physiology», *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 104, n.º 50, pp. 20131-20136, dic. 2007, doi: 10.1073/pnas.0704901104.
- [11] «Defensas vegetales contra la herbivoría», Wikipedia. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Defensas_vegetales_contra_la_herbivor%C3%ADa
- [12] T. Colombi, B. K. Pandey, A. Chawade, M. J. Bennett, S. J. Mooney, y T. Keller, «Root plasticity versus elasticity – when are responses acclimative?», *Trends Plant Sci.*, vol. 29, n.º 8, pp. 856-864, ago. 2024, doi: 10.1016/j.tplants.2024.01.003.
- [13] A. P. Vovides y S. Galicia, «Plantas a la defensiva: espinas, agujones e idioblastos», *17*, pp. 31-37, 6 de febrero de 2025.
- [14] F. Sautua y M. Carmona, «Sistema de Inmunidad basal: Barreras Constitutivas o Preexistentes», Sistema de Inmunidad basal: Barreras Constitutivas o Preexistentes. [En línea]. Disponible en: https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page_id=6092&utm_source=
- [15] L. Márquez Juárez, «Efecto del estrés osmótico inducido in vitro en las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 de caña de azúcar.», Universidad Veracruzana, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://cdigital.uv.mx/server/api/core/bitstreams/1fcd1866-aaab-4bec-b82c-6a6612877ff2/content>
- [16] B. Hu, J. Cao, K. Ge, y L. Li, «The site of water stress governs the pattern of ABA synthesis and transport in peanut», *Sci. Rep.*, vol. 6, n.º 1, p. 32143, oct. 2016, doi: 10.1038/srep32143.
- [17] E. W. Chehab, E. Eich, y J. Braam, «Thigmomorphogenesis: a complex plant response to mechano-stimulation», *J. Exp. Bot.*, vol. 60, n.º 1, pp. 43-56, nov. 2008, doi: 10.1093/jxb/ern315.
- [18] V. Goykovic Cortés y G. Saavedra Del Real, «Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y prácticas agronómicas de su manejo», *Idesia Arica*, vol. 25, n.º 3, dic. 2007, doi: 10.4067/S0718-34292007000300006.
- [19] P. Kogut, «Degradación Del Suelo: Técnicas Para Evitar Sus Efectos», Degradación Del Suelo: Técnicas Para Evitar Sus Efectos. [En línea]. Disponible en: <https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/>
- [20] J. Lúquez, G. Eyherabide, y L. R. Petigrosso, «Tolerancia a la salinidad del suelo en especies de interés agronómico.», *Nexos*, n.º 34, dic. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://revista.mdp.edu.ar/nexos/article/view/11>
- [21] K. L. Gartley, «Recommended Methods for Measuring Soluble Salts in Soils», may 2011, [En línea]. Disponible en: <https://www.udel.edu/content/dam/udelImages/canr/pdfs/extension/factsheets/soiltest-recs/CHAP10.pdf>
- [22] O. Rodríguez y R. Dufour, «Suelos Salinos y Sódicos: Identificación, Mitigación y Consideraciones de Manejo», Suelos Salinos y Sódicos: Identificación, Mitigación y Consideraciones de Manejo. [En línea]. Disponible en: <https://attra.ncat.org/publication/suelos-salinos-y-sodicos-identificacion-mitigacion-y-consideraciones-de-manejo/>
- [23] S. Montoya Sanchez-Camacho, «Prevención y recuperación de suelos salinos», Prevención y recuperación de suelos salinos. [En línea]. Disponible en: <https://tecnicrop.com/blog/prevencion-y-recuperacion-de-suelos-salinos>
- [24] A. F. González Villaveces, «Especies halófitas de importancia agrícola como alternativa de biorremediación de suelos con problemas de salinización en Colombia.», Revisión Bibliográfica, Universidad de Ciencias Ambientales y Aplicadas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/9a94ed5d-0bb7-48a7-8397-e7876906b8c0/content>
- [25] I. Khan *et al.*, «Perspectives of phytohormones application to enhance salinity tolerance in plants», en *New Insights Into Phytohormones*, IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1003714.
- [26] J. Azcón Bieto y M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 2.ª ed. McGraw-Hill Interamericana, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
- [27] J. S. Alcántara Cortes, J. Acero Godoy, J. D. Alcántara Cortés, y R. M. Sánchez Mora, «Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal», *Nova*, vol. 17, n.º 32, pp. 109-129, abr. 2019, doi: 10.22490/24629448.3639.
- [28] V. Verma, P. Ravindran, y P. P. Kumar, «Plant hormone-mediated regulation of stress responses», *BMC Plant Biol.*, vol. 16, n.º 1, p. 86, abr. 2016, doi: 10.1186/s12870-016-0771-y.
- [29] M. Jordán y J. Casaretto, «Hormonas y Reguladores del Crecimiento: Etileno, Ácido Abscísico, Brasinoesteroides, Poliaminas, Ácido Salicílico y Ácido Jasmónico», [En línea]. Disponible en: <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Etileno,aba,jasmonico,brasino,.pdf>

- [30] N. Suzuki *et al.*, «ABA Is Required for Plant Acclimation to a Combination of Salt and Heat Stress», *PLOS ONE*, vol. 11, n.º 1, p. e0147625, ene. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0147625.
- [31] K. Vishwakarma *et al.*, «Abscisic Acid Signaling and Abiotic Stress Tolerance in Plants: A Review on Current Knowledge and Future Prospects», *Front. Plant Sci.*, vol. 08, feb. 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00161.
- [32] R. Riyazuddin *et al.*, «Ethylene: A Master Regulator of Salinity Stress Tolerance in Plants», *Biomolecules*, vol. 10, n.º 6, p. 959, jun. 2020, doi: 10.3390/biom10060959.
- [33] P. J. Zapata, M. Serrano, M. F. García-Legaz, M. T. Pretel, y M. A. Botella, «Short Term Effect of Salt Shock on Ethylene and Polyamines Depends on Plant Salt Sensitivity», *Front. Plant Sci.*, vol. 8, p. 855, may 2017, doi: 10.3389/fpls.2017.00855.
- [34] T. Ribba, F. Garrido-Vargas, y J. A. O'Brien, «Auxin-mediated responses under salt stress: from developmental regulation to biotechnological applications», *J. Exp. Bot.*, vol. 71, n.º 13, pp. 3843-3853, may 2020, doi: 10.1093/jxb/eraa241.
- [35] M. A. Mónaco, «Caracterización de la tolerancia a estrés salino del sistema Tabebuia aurea Methylobacterium», Tesis de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional de Luján, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ri.unlu.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/rediunlu/1063/18%20-%20MONACO%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [36] D. Franco Aragón, «Caracterización de compuestos químicos agonistas de los receptores de ABA, en las plantas modelo Arabidopsis thaliana y Setaria viridis», Trabajo Fin de Máster en Biotecnología Molecular y Celular de Plantas, Universitat Politècnica de València, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/5d8a8f1b-d263-4c23-97eb-2c68d529f553/content>
- [37] A. Imen, «Abiotic stress in plants: Late Embryogenesis Abundant proteins», Título de Doctorado, Universidad de Barcelona, 2012. [En línea]. Disponible en: https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/36318/4/IMEN_AMARA_PhD_THESIS.pdf
- [38] L. Ruz Estévez, E. Badosa Romáño, y E. Montesinos Seguí, «Las proteínas de estrés en las plantas», n.º 159, pp. 49-51, 2004.
- [39] H. Yi-Qin *et al.*, «Genome-wide analysis of ethylene-insensitive3 (EIN3/EIL) in *Triticum aestivum*», *Crop Sci.*, vol. 60, n.º 4, pp. 2019-2037, jul. 2020, doi: 10.1002/csc2.20115.
- [40] J. Debbarma, Y. N. Sarki, B. Saikia, H. P. D. Boruah, D. L. Singha, y C. Chikkaputtaiah, «Ethylene Response Factor (ERF) Family Proteins in Abiotic Stresses and CRISPR-Cas9 Genome Editing of ERFs for Multiple Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants: A Review», *Mol. Biotechnol.*, vol. 61, n.º 2, pp. 153-172, feb. 2019, doi: 10.1007/s12033-018-0144-x.
- [41] H. L. Park *et al.*, «Ethylene-triggered subcellular trafficking of CTR1 enhances the response to ethylene gas», *Nat. Commun.*, vol. 14, n.º 1, p. 365, ene. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-35975-6.
- [42] J. Cerezo Martínez, «Fisiología Vegetal Tema XII Etileno», Universidad Politécnica de Cartagena. [En línea]. Disponible en: <https://georgiusm.com/wp-content/uploads/2017/11/tema-12-etileno.pdf>
- [43] W. Du *et al.*, «TIR1/AFB proteins: Active players in abiotic and biotic stress signaling», *Front. Plant Sci.*, vol. 13, p. 1083409, nov. 2022, doi: 10.3389/fpls.2022.1083409.
- [44] K. L. Ung *et al.*, «Structures and mechanism of the plant PIN-FORMED auxin transporter», *Nature*, vol. 609, n.º 7927, pp. 605-610, sep. 2022, doi: 10.1038/s41586-022-04883-y.
- [45] S.-B. Li, Z.-Z. Xie, C.-G. Hu, y J.-Z. Zhang, «A Review of Auxin Response Factors (ARFs) in Plants», *Front. Plant Sci.*, vol. 7, feb. 2016, doi: 10.3389/fpls.2016.00047.
- [46] N. Stortenbeker y M. Bemer, «The SAUR gene family: the plant's toolbox for adaptation of growth and development», *J. Exp. Bot.*, vol. 70, n.º 1, pp. 17-27, ene. 2019, doi: 10.1093/jxb/ery332.
- [47] R. Waadt, C. A. Seller, P.-K. Hsu, Y. Takahashi, S. Munemasa, y J. I. Schroeder, «Plant hormone regulation of abiotic stress responses», *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, vol. 23, n.º 10, pp. 680-694, oct. 2022, doi: 10.1038/s41580-022-00479-6.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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

Aprovechamiento de los tallos de caña india (*Dracaena fragans*) como sustrato para la producción de tomate en hidroponía

Use of chopped stems of *Dracaena fragans* as a substrate for tomato production in hydroponics




Rubén Calderón-Cerdas¹, José María Alvarado-Vargas², Roel Campos-Rodríguez³

Fecha de recepción: 27 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 3 de octubre, 2025

Calderón-Cerdas, R; Alvarado-Vargas, J.M; Campos-Rodríguez, R. Aprovechamiento de los tallos de caña india (*Dracaena fragans*) como sustrato para la producción de tomate en hidroponía. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 54-62.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8003>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronegocios, Cartago, Costa Rica.
 racalderon@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2791-0106>
- 2 Facultad de Ingeniería Química y Tecnología. Politechnika Krakowska. Cracovia, Polonia.
 josemalvaradov@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0009-8723-0493>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronegocios, Cartago, Costa Rica.
 rocampos@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>

Palabras clave

Valorización de residuos; *Dracaena fragans*; sustratos hidropónicos; producción de tomate.

Resumen

Se probó el tallo de caña india troceado como sustrato para la producción de tomate en hidroponía en un ambiente protegido. Para ello, se sembró tomate variedad JR. Los tratamientos consistieron en utilizar distintas proporciones de caña india como sustrato. Se rellenaron macetas al 100, 75, 50, 25 y 0 % de caña india, el resto de la proporción fue completado con fibra de coco. Todos los tratamientos recibieron la misma fertilización y riego, esto a través de un sistema de goteo. Como resultados, se obtuvo que todas las plantas de tomate crecieron de la misma manera, independientemente de la proporción de caña india que tuvieron. El desarrollo foliar no mostró diferencias entre los tratamientos. En cuanto al rendimiento, las proporciones de 50:50 y 25:75 caña india: fibra de coco, respectivamente, resultaron en la mayor productividad, lo que demostró la capacidad de este residuo agroindustrial de fungir como sustrato. No se presentó ninguna enfermedad asociada al uso de los tallos de caña india.

Keywords

Waste valorization; *Dracaena fragans*; hydroponic substrate; tomato production.

Abstract

The chopped stem of *Dracaena fragans* plant was tested as a substrate for tomato production in hydroponics in a greenhouse. The variety of tomato called JR was planted and different proportions of chopped stem mixed with coconut fiber were used as a substrate. The treatments consisted of using different proportions of cornstalk plant as substrate: pots were filled at 100, 75, 50, 25% and 0%, the rest of the proportion was completed with coconut fiber. All treatments received the same fertilization and irrigation, this through a drip system. As a result, it was obtained that all tomato plants grew in the same way regardless of the proportion of cornstalk plant they had. Leaf development was the same for all treatments. Regarding performance, the proportions of 50:50 and 25:75 cornstalk plant: coconut fiber respectively, resulted in the highest productivity, which demonstrated the capacity of this agro-industrial waste to serve as a substrate. There was no disease associated with the use of cane stalks plant stubble.

Introducción

El tomate es una de las hortalizas con mayor relevancia a nivel mundial, tanto en lo económico como en lo productivo [1]. Datos de la FAO indicaron que durante el 2022 se produjeron más de 180 millones de toneladas de tomate en el mundo. Además, entre 2019 y 2021, se registró un crecimiento de 13.5% anual con respecto a años anteriores. Costa Rica, durante el 2021, produjo 58459 toneladas de tomate y su consumo per cápita fue de 18,8 kg, lo que refleja la importancia de este cultivo a nivel nacional. En Costa Rica, la producción la encabeza la región Central Occidente (Alajuela y Heredia) y la región Central Oriental (Cartago); las cuales abarcan un 61% y 12% de la producción nacional, respectivamente

La producción de tomate se realiza en ambientes semiprottegidos o protegidos. En los ambientes semiprottegidos se utilizan bandas plásticas que protegen al cultivo de la lluvia y su respectivo salpique. Esto reduce los problemas relacionados a enfermedades fúngicas y bacteriales como

la fusariosis, marchitez bacterial y el tizón tardío. Por su parte, los ambientes protegidos más usados son los invernaderos, los cuales aportan una mayor protección, además de permitir la producción durante todo el año [2].

La producción hidropónica de tomate forma parte de las técnicas de cultivo bajo sistemas de ambiente protegido. Las técnicas hidropónicas utilizan sustratos inertes como piedra, roca volcánica o fibras naturales sin presencia de suelo. Para nutrir las plantas, se aplica una solución nutritiva con los compuestos necesarios para el desarrollo de las plantas; en donde se puede, o no, utilizar un medio sólido de cultivo. La producción bajo estos sistemas ha tenido un crecimiento en los últimos años debido a que hay una menor incidencia de infecciones, mejor manejo del crecimiento de los cultivos y se obtienen cosechas de mejor calidad [3].

Los sustratos utilizados para la siembra pueden ser orgánicos o sintéticos (poliuretano y poliestireno). Las fibras, cortezas de madera, fibra de coco y turba son ejemplos de sustratos orgánicos comunes en la producción hidropónica. Cada sustrato presenta una diferente permeabilidad al aire y de retención de humedad [3]. Al poseer fibras de diversos tamaños se consigue una importante capacidad de retención de agua (entre 60-120%), además de poseer una alta porosidad que permite el flujo de gases como el oxígeno y dióxido de carbono [4].

La fibra de coco es uno de los medios orgánicos utilizados en hidroponía. Es obtenida de la cáscara del fruto; muchas veces es un subproducto agroindustrial [3]. La fibra de coco es una opción viable especialmente en regiones tropicales y subtropicales ya que la presencia de materia prima es abundante. Este medio de cultivo es efectivo por su estructura física, al ser capaz de permitir el flujo de aire y su capacidad de retener agua y nutrientes, lo que evita problemas relacionados a la asfixia y estrés por sequía en las raíces [5]. La principal ventaja de usar fibra de coco en la producción hidropónica es que contiene entre 30-40% de lignina [6], un polisacárido conocido, junto con la celulosa, por ser resistentes a la degradación microbiológica [5].

La caña india (*Dracaena L.*) es una planta monocotiledona de la familia taxonómica *Asparagaceae*. Esta familia cuenta con cerca de 13 especies registradas [7]. Usualmente, se usa como ornamental, sobre todo en interiores y como cerca viva en cultivos de café. En Costa Rica, se exporta como planta ornamental. Durante la etapa de selección de los tallos que serán exportados, los que no cumplen con los criterios de calidad son descartados. Esto genera residuos que generan lixiviados. La caña india residual no registra actualmente ningún proceso de aprovechamiento que logre disminuir el impacto ambiental. Investigaciones previas indicaron que la fibra de hojas de caña india puede resultar en una opción innovadora para la obtención de fibras orgánicas al poseer un 70% de celulosa, 11% de hemicelulosa y 11% de lignina [8]. Con base en la necesidad de opciones para valorizar los subproductos de caña india y en su composición química, en este estudio se evaluó su uso como sustrato orgánico en la producción hidropónica de tomate.

Materiales y métodos

Se sembraron 126 plantas de tomate dentro de un ambiente protegido tipo invernadero. La unidad experimental consistió en una planta de tomate sembrada en una maceta. El ensayo tuvo cinco tratamientos: sustrato con 100% caña india, 100% fibra de coco, 75% caña india + 25% fibra de coco; 50% caña india + 50% coco y 25% caña india + 75% de coco. Las mezclas corresponden a medidas volumétricas. Las plantas se sembraron el mismo día. El diseño experimental fue un irrestricto al azar con 18 repeticiones por tratamiento para un total de 90 plantas. Por tanto, se utilizaron 18 unidades experimentales por tratamiento. El resto de las plantas sembradas (36 plantas) pretendió evitar el efecto del borde.

Como material de siembra se utilizó la variedad JR, un tomate de crecimiento determinado. Las plántulas se adquirieron con 35 días de sembradas y 12 cm de altura. El trasplante se realizó manualmente colocando una única planta por cada maceta. Las plantas se sembraron en macetas plásticas de 4,5 L de capacidad. Con respecto a la distribución espacial de las plantas, la distancia entre plantas fue de 1,4 m entre hileras y 0,4 m entre plantas. Se colocaron siete hileras con 18 plantas cada una.

El ambiente protegido se ubicó en las instalaciones de la Escuela de Agronegocios del Tecnológico de Costa Rica. Las paredes estuvieron forradas con malla anti-áfidos. El techo tenía plástico transparente. El piso estaba cubierto con un protector sintético de polipropileno. El sistema de fertirrigación suplió a las plantas de tres riegos y de una fertilización diaria. La cantidad de agua aportada al cultivo varió según el desarrollo de las plantas. La cantidad de riego fue estimada con la evapotranspiración potencial (Eto) y con un coeficiente del cultivo (Kc) de entre 0,3 para plantas pequeñas, 1,3 para plantas en máxima producción y de 0,7 para etapas finales de producción.

El plan de fertilización se realizó con base en las curvas de absorción de los nutrientes descrita por Quesada y Bertsch [9]. Se calculó y se sumó la cantidad de cada nutriente requerida por la planta por semana. Esta cantidad semanal se suministraba con un sistema de riego por goteo. La dosis de fertilizante aplicado se basó en un rendimiento de 60 Tm/ha. Se utilizó 263 Kg/ha de potasio, 180 Kg/ha de nitrógeno, 125 Kg/ha de calcio, 32 Kg/ha de magnesio, 27 Kg/ha de azufre y 13 Kg/ha de fósforo. Las variables evaluadas semanalmente fueron la altura de las plantas, el índice de área foliar, la producción de tomates, número de tomates por planta y la cantidad de tomates dañados. Los datos fueron analizados según estadística descriptiva e inferencial. Se utilizó el software Infostat Profesional + R 3.6.3. Se realizaron pruebas de Shapiro-Wilk para la normalidad, prueba de Levigne para la heterocedasticidad y de Residuos para la aditividad. Se analizó la varianza de los datos y se utilizó la prueba de DMS como separador de medias.

Por otro lado, se calculó la capacidad de retención de agua de los sustratos. Para ello, se colocaron cinco macetas por cada tratamiento y se saturaron con agua durante 4 horas. Posteriormente, cada maceta fue retirada del agua y se dejó 30 minutos para que el agua escurriera. Se pesaron e inmediatamente se colocaron en una estufa 90 C durante 36 horas. Pasado el tiempo, cada repetición fue pesada. La humedad gravimétrica fue determinada a partir de la medición de suelo húmedo y luego del mismo suelo seco en estufa, mediante la fórmula:

Para determinar el tamaño de la partícula prevalente en el sustrato de Caña India, se tomaron siete muestras de sustrato, se clasificó las partículas en distintos tamaños (de 0 a 10 mm; 11 a 20 mm; 21 a 30 mm y 31mm o más) y se pesó cada fracción. Además, durante el desarrollo de las plantas, se evaluó semanalmente la presencia de síntomas de la infección por parte de los hongos *Fusarium* spp. *Rhizoctonia*, *Phyitium*, *Phythophtora* sp, *Alternaria* sp y de la deficiencia de Ca en frutos. Se evaluó la incidencia de todas ellas.

Resultados y discusión

Las plantas de tomate sembradas en sustrato de fibra de coco y fibra de caña se desarrollaron con normalidad. No se presentó clorosis, enfermedades asociadas al sustrato ni bajo vigor.

Caña india como sustrato

El tallo de caña india es semileñoso, por lo que al ser molido en trozos puede fungir como sustrato. El tallo semileñoso retiene más humedad que los tallos leñosos. La proporción carbono nitrógeno del tallo de la caña india fue de 38, esto le confiere porosidad, retención de humedad

y un tiempo de descomposición mayor a los 2 años. La humedad gravimétrica calculada para el sustrato de caña india fue de 218%; por lo que se clasifica como un sustrato de alta retención de humedad. Otros sustratos como la fibra de coco tienen un 110% de humedad, mientras que la humedad gravimétrica del suelo ronda del 40 al 75%. La mezcla 1:1 de la caña india con fibra de coco proporcionó una humedad gravimétrica de 145%, mientras que la mezcla 3:1 brindó 193% (ver figura 1).

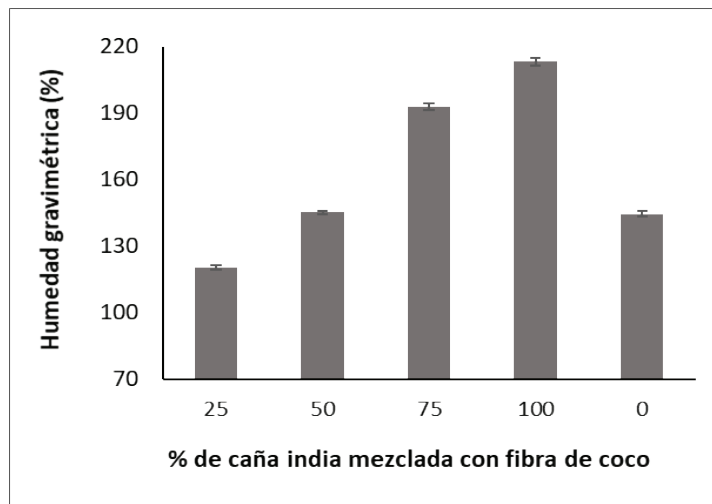


Figura 1. Humedad gravimétrica de distintas proporciones de tallo de caña india y fibra de coco (n=18).

La relación entre el tamaño de la partícula y la humedad gravimétrica es un tema de interés en diversos campos, como la agronomía, la geología y la ciencia del suelo. Tradicionalmente, se ha asumido que a medida que el tamaño de las partículas disminuye, aumenta la capacidad de retención de humedad del sustrato debido a una mayor superficie específica disponible para la adsorción de agua. Sin embargo, la relación entre estas dos variables puede ser más compleja.

Estudios de las propiedades de los sustratos, demostraron que la relación entre el tamaño de partícula y la retención de humedad influye significativamente. Por ejemplo, la estructura del sustrato, la porosidad y la composición química pueden afectar la capacidad de retención de humedad de manera independiente al tamaño de partícula, [10] encontraron que la forma de las partículas también puede influir en la retención de humedad. Partículas más angulares o irregulares pueden crear espacios intersticiales que favorecen la retención de agua, incluso si el tamaño de las partículas es relativamente grande.

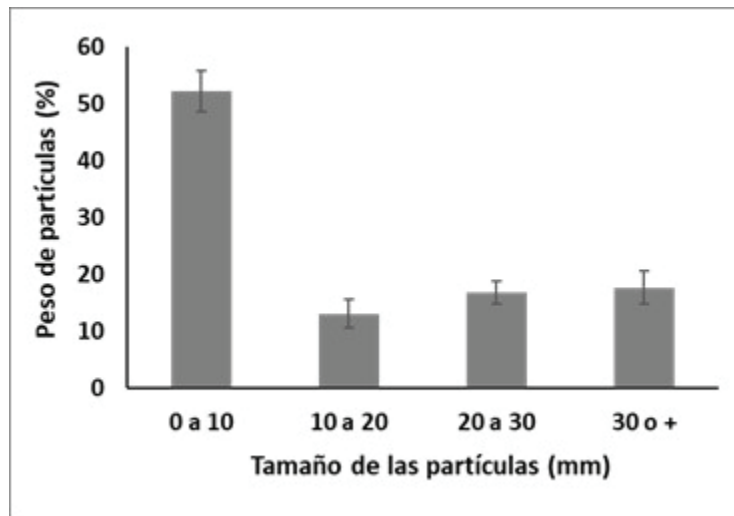


Figura 2. Distintos tamaños de partículas del sustrato de caña india de una muestra aleatoria del sustrato (n=7).

Reducir la retención de humedad del sustrato mediante el picado del tallo en partículas más grandes es una estrategia comúnmente utilizada en la agricultura y la horticultura para controlar el nivel de humedad del suelo o sustrato. Esta práctica se basa en la teoría de que el tamaño de las partículas influye significativamente en la capacidad de retención de agua y en la porosidad del sustrato, [10] se demostraron que el tamaño de las partículas del sustrato afecta directamente la capacidad de retención de humedad. Los investigadores encontraron que a medida que el tamaño de las partículas aumenta, disminuye la capacidad de retención de humedad del sustrato.

Además, otro estudio realizado por Tang et al. [11] examinó la relación entre el tamaño de las partículas y el espacio poroso en el sustrato. Los resultados mostraron que las partículas más grandes creaban una estructura porosa con más espacio entre ellas, lo que facilita el drenaje del agua y reducía la retención de humedad. Por lo tanto, al picar el tallo en partículas más grandes, se aumenta el tamaño de las partículas en el sustrato, lo que a su vez disminuye su capacidad de retención de humedad y promueve un mejor drenaje.

Índice de área foliar del tomate

En cuanto al área foliar, no se encontró diferencia entre los distintos tratamientos. El área foliar creció paulatinamente sin mostrar diferencias entre los tratamientos. El índice de área foliar fue de 0,52 durante la segunda semana después del trasplante y alcanzó valores de 3,9 durante el inicio de la fructificación (10 semanas después de trasplante). Para plantas de tomate, se estima que el índice de área foliar adecuado debe estar entre 4 y 5. Entre estos valores se garantiza el máximo rendimiento, aprovechamiento de la radiación solar sin que exista competencia entre las plantas o que se generen condiciones propicias para la infección de patógenos.

En estudios recientes se ha observado que la dinámica del índice de área foliar (*LAI*) está relacionada con la variación del rendimiento en cultivos. Yamamoto et al. [12] encontraron que los parámetros derivados del *LAI* en soya explicaron parte de la variación espacial y anual del rendimiento en parcelas de agricultores, lo que respalda la utilización del *LAI* como indicador para estimar tendencias de productividad bajo condiciones de campo. En un estudio realizado por Hashimoto et al. [13] se encontró una correlación significativa entre el índice de área foliar y el rendimiento del tomate. Se observó que a medida que aumentaba el IAF (índice de área foliar) también lo hacía el rendimiento de frutos por planta.

Cabe destacar, que el aumento en la densidad de siembra promovería el índice de área foliar, sin embargo, al haber mayor cantidad de plantas, habrá que invertir en mayor número de recursos como agua, semilla, nutrientes, infraestructura de riego (figura 3).

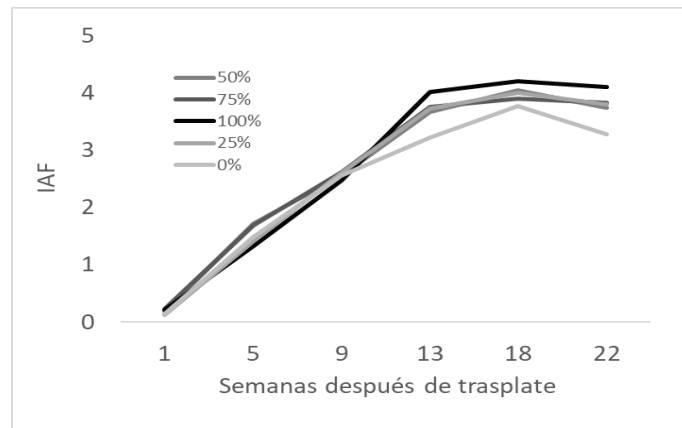


Figura 3. Índice de área foliar de las plantas de tomate creciendo en sustratos de fibra de coco y caña india a distintas proporciones respecto a la caña india (n=18).

Rendimiento del cultivo de tomate

El rendimiento de un cultivo es el resultado de la eficiencia de las plantas en el uso de los recursos. Los recursos del suelo, en este caso del sustrato, principalmente son los nutrientes, agua y espacio aéreo. El tallo molido de caña india demostró ser capaz de fungir como sustrato para la producción hidropónica de tomate (Figura 4). Las proporciones de 50:50 y 25:75 caña india:fibra de coco, resultaron en la mayor producción de tomate (3,5 Kg/planta), esto manteniendo la calidad del fruto. El uso exclusivo de fibra de coco y de caña india mostró valores inferiores al uso de mezclas (2,7 vs 3,5 Kg/planta).

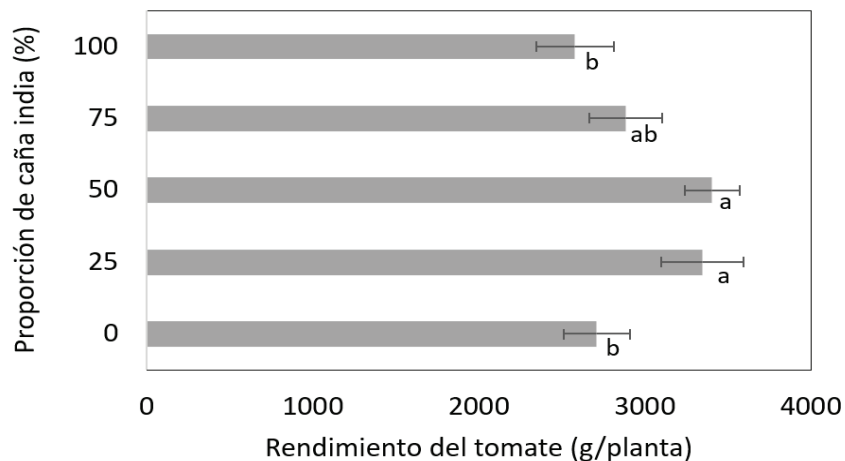


Figura 4. Producción de plantas de tomate sembradas en distintas proporciones de dos sustratos: tallos de caña india molidos y fibra de coco. Los porcentajes refieren a la cantidad de caña india en una mezcla volumétrica (n=18).

Al moler el tallo de la caña india, quedaron trozos de distintos tamaños, algunos de hasta 5 cm de longitud por 1 cm de ancho. El tallo de la caña posee tejido conductivo y estructural por lo que la humedad del sustrato se debe al agua del xilema, agua con azúcares provenientes del

floema y el agua contenida en las células. Por ello, los azúcares podrían fermentar el sustrato y liberar ácidos orgánicos [14]. Para evitar el efecto tóxico de los ácidos orgánicos, es prudente que el tiempo entre la corta de la caña y la molienda sea de al menos 10 días, con este tiempo, el proceso de respiración hará que los tejidos consumen los azúcares y el tallo pierda humedad. Dicha recomendación concuerda con Tixier et al. [15], quien argumentó que los azúcares de un tallo son consumidos por el tallo a través de procesos de respiración.

Las mezclas entre fibra de coco y de caña india proporcionaron mejores condiciones para las raíces que los sustratos puros. Esto en cuanto a la humedad del sustrato, retención de la humedad, espacio aéreo, y retención de los nutrientes.

Conclusiones

Al evaluar caña india molida como sustrato en la producción de tomate hidropónico se demostró que al ser añadida hasta en un 50% se aumentó la productividad del tomate. Sin embargo, al ser utilizado en proporciones mayores al 50% (75% y 100%) se encontró que disminuyó la producción total. Por su parte, el sustrato no afectó la calidad del fruto, tampoco el desarrollo de la planta.

Recomendaciones

Se recomienda tomar en cuenta el tiempo transcurrido entre la cosecha de la caña y la siembra del tomate. La caña fresca libera sabia y sustancias de reserva del tallo. La descomposición inicial de estos líquidos podría generar algún problema a las plántulas de tomate.

El aprovechamiento de los residuos vegetales derivados de la agroindustria puede usarse para generar abonos, materiales, combustibles, entre otros. Por lo que se deben promover las investigaciones en esta línea ambiental.

El residuo de tallo de caña india está disponible y su uso como sustrato en la agricultura hidropónica tiene un potencial ante la escasez y precio de sustratos como la fibra de coco.

Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Investigación y Extensión en Gestión Agroindustrial y Agronegocios CIGA, a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo al proyecto Evaluación del uso Potencial de Fibras Naturales como Biomaterial, Código: 1431034, a Compendia R.L. y a la Escuela de Agronegocios. Además, a Wendy Rivera Jiménez por su colaboración en la elaboración de gráficos y figuras.

Referencias

- [1] F. Martínez-Ruiz, L. Cervantes-Díaz, C. Aíl-Catzim, L. Hernández-Montiel, C. Sánchez, and E. Rueda-Puente, "Hongos *fitopatógenos* asociados al tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) en la zona árida del noroeste de México: la importancia de su diagnóstico," *European Scientific Journal*, vol.12, no. 18, 2016.
- [2] INTA. "Manual técnico del cultivo de tomate (*Solanum Lycopersicum*)," 2017. [Online]. Available: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>
- [3] S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, and G. Burnell, "Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future," Springer Nature, 2019.
- [4] J. Wallach, "Physical characteristics of soilless media". in *Soilless culture, theory and practice*, Y. Raviv and J. Lieth, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2008, pp41-116.
- [5] S. Patil, U. Kadam, M. Mane, D. Mahale, and J. Dhekale, "Hydroponic growth media (substrate): a review", *Int. Res. J. Pure Appl. Chem*, vol. 21, pp106-113, 2020.

- [6] A. Mankar, A. Pandey, and K. Pant, "Microwave-assisted extraction of lignin from coconut coir using deep eutectic solvents and its valorization to aromatics," *Bioresource Technology*. Vol.345, p.126528, 2022.
- [7] ITIS, "Integrated Taxonomic Information System – Report: *Dracaena* L.," 2023. [Online]. Available: https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt.jsessionid=47ACF8B0E738C6026740B6B5DF3F9BD7?search_topic=TSN&search_value=500631#null. [Accessed: Feb. 05, 2025].
- [8] P. Manimaran, S. Saravanan, M. Sanjay, S. Siengchin, M. Jawaid, and A. Khan, "Characterization of new cellulosic fiber: *Dracaena reflexa* as a reinforcement for polymer composite structures," *Journal of Materials Research and Technology*, vol.8, no.2, pp. 1952-1963,2019.
- [9] G. Quesada-Roldán and F. Bertsch-Hernández, "Fertirriego en el rendimiento de híbridos de tomate producidos en invernadero," *Agronomía Mesoamericana*, vol. 23, no. 1, pp. 1–11, 2012.
- [10] H. Li, Y. Li, and S. Liu, "Influence of Particle Shape and Particle Size on Soil Water Retention". *Soil Science Society of America Journal*, vol.81, no.2, pp. 345-356, 2017.
- [11] Y. Tang, Y. Shen, W. Ai, Z. Wu, R. Mao, H. Wu, W. Hu y H. Feng, "Effects of Different Particle Sizes on the Bulk Density, Porosity Character, Water Suction of Substrates (in Chinese)," *Chinese Journal of Space Science*, vol. 42, no. 6, pp. 1161–1170, 2022, doi: 10.11728/cjss2022.06.220125009.
- [12] S. Yamamoto, N. Hashimoto and K. Homma, "Evaluation of LAI dynamics by using plant canopy analyzer and its relationship to yield variation of soybean in farmer field," *Agriculture*, vol. 13, no. 3, art. 609, 2023, doi: 10.3390/agriculture13030609.
- [13] N. Hashimoto, Y. Saito, S. Yamamoto, T. Ishibashi, R. Ito, M. Maki y K. Homma, "Relationship between Leaf Area Index and Yield Components in Farmers' Paddy Fields," *AgriEngineering*, vol. 5, no. 4, pp. 1754–1765, 2023, doi: 10.3390/agriengineering5040108.
- [14] Salami, Y., Jaafri, R. Correlation between shape parameters of particle size distribution and soil water retention curves. *Geo-Engineering* 16, 21 (2025). <https://doi.org/10.1186/s40703-025-00251-7>
- [15] A. Tixier, G. A. Gambetta, J. Godfrey, J. Orozco y M. A. Zwieniecki, "Non-structural Carbohydrates in Dormant Woody Perennials; The Tale of Winter Survival and Spring Arrival," *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 2, art. 18, May 2019, doi: 10.3389/ffgc.2019.00018.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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

Suplementación nutricional del tomate con el alga marina (*Ascophyllum nodosum*)

Nutritional supplementation of tomato with the marine algae (*Ascophyllum nodosum*)

Daniela Blanch-Bermúdez¹, Rubén Calderón–Cerdas²

Fecha de recepción: 29 de junio, 2025
Fecha de aprobación: 18 de octubre, 2025

Blanch-Bermúdez, D; Calderón–Cerdas, R. Suplementación nutricional del tomate con el alga marina (*Ascophyllum nodosum*). *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 63-73.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8006>



- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronegocios, Cartago, Costa Rica.
 dani.blanchb@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0007-6559-331X>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronegocios, Cartago, Costa Rica.
 racalderon@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2791-0106>

Palabras clave

Nutrición vegetal, fertirriego, *Ascophyllum nodosum*, tomate hidropónico.

Resumen

Para 2025, la producción mundial de tomate superó los 188 millones de toneladas. En los últimos 30 años el rendimiento del tomate se duplicó, lo que conllevó al uso intenso de fertilizantes. El uso de abonos orgánicos y otras fuentes de nutrientes toman importancia para la producción de alimentos. Las macroalgas como *Ascophyllum nodosum*, son de interés como biofertilizantes ya que promueven el crecimiento, resistencia al estrés abiótico y mejora la calidad física y química de los suelos. Se estableció un ensayo con el objetivo de valorar la eficiencia de las algas como fertilizante. Para ello, se comparó una solución nutritiva elaborada con fertilizantes químicos solubles y otra solución formulada con algas más una suplementación de fertilizantes químicos solubles. Los cálculos se realizaron de manera en que ambas formulaciones tuvieran el mismo aporte químico de nutrientes. El ensayo se estableció bajo un ambiente protegido utilizando fibra de coco como sustrato y con fertirriego por goteo. Se sembraron 90 plantas por cada tratamiento. Se evaluó el rendimiento del cultivo, índice de área foliar, número de hojas, altura de la planta, análisis químico foliar y peso de los frutos. En el caso de la calidad de los frutos, se analizó el color, la firmeza, contenido de sólidos solubles y vida en anaquel. Se encontró que el peso fresco de la cosecha fue mayor para el tratamiento químico. Con respecto a la calidad del fruto, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Keywords

Plant nutrition, fertigation, *Ascophyllum nodosum*, hydroponic tomato.

Abstract

By 2025, global tomato production exceeded 186 million tons. Over the past 30 years, tomato yields have doubled, leading to intensive use of fertilizers. The use of organic fertilizers and other nutrient sources is becoming important for food production. Macroalgae such as *Ascophyllum nodosum* are of interest as fertilizers since they promote growth, resistance to abiotic stress, and soil quality. A trial was established with the aim of assessing the efficiency of algae as a fertilizer. To do this, the use of soluble chemical fertilizers was compared against a fertilization plan that included algae in addition to a chemical fertilizer supplement. The calculations were made so that both formulations had the same nutritional contribution. The trial was established under a protected environment using coconut fiber as a substrate and with drip fertigation. 90 plants were planted for each treatment. Crop yield, leaf area index, number of leaves, plant height, chemical analysis of leaves and fruit weight were evaluated. In the case of fruit quality, color, firmness, soluble solids content and shelf life were analyzed. It was found that the fresh weight of the harvest was higher for the chemical treatment. Regarding fruit quality, no significant differences were found between treatments.

Introducción

El tomate es uno de los cultivos hortícolas más importantes del mundo debido a su consumo en fresco y procesado. El aumento en área de siembra del tomate ha sido sostenido [1]. En Costa Rica, el tomate se siembra durante todo el año y representa un cultivo de interés económico

para el país, pues es la hortaliza de mayor consumo en Costa Rica. La producción del tomate está en manos de más de mil productores, los cuales generan 50.000 toneladas en total por año. Esto significa ingresos totales de diez mil millones de colones [2].

Las algas marinas y sus extractos son utilizadas como fertilizantes en la agricultura. Se ha estudiado de manera extensa el uso de algas como *Ascophyllum nodosum* y sus extractos debido a que mejoran el crecimiento de las plantas y promueven la tolerancia al estrés de los cultivos [3]. Los fertilizantes basados en algas marinas son alternativas efectivas a los fertilizantes químicos. Esto gracias a que son biodegradables descomponiéndose en nutrientes para la absorción por parte de las plantas. Adicionalmente, mejoran las cualidades del suelo como la aireación, absorción de nutrientes y la retención de humedad, promoviendo la fertilidad de los suelos [4]. El objetivo de este trabajo fue el de determinar experimentalmente el desarrollo y rendimiento del cultivo de tomate en condiciones de invernadero utilizando el alga *Ascophyllum nodosum* como suplemento orgánico a la fertilización química.

Materiales y métodos

El ensayo fue realizado dentro de un ambiente protegido. Se tuvo dos tratamientos de nutrición. El primero de ellos consistió en el uso de fertilizantes solubles y el otro tratamiento fue a base de algas suplementado con fertilizantes solubles. Dentro del invernadero se sembraron 10 hileras con 18 plantas cada hilera. De manera aleatoria, 5 hileras se dedicaron a cada tratamiento. En total, cada tratamiento contó con 90 plantas. Se utilizó fibra de coco como sustrato. Cada maceta contuvo 5 L de fibra de coco.

La distancia entre las plantas fue de 35 cm. La parcela útil de cada hilera fue de 14 plantas, ya que se eliminaron dos plantas de cada extremo de cada hilera por efecto de borde. El sistema de hileras se estableció por la necesidad de contar con un sistema de riego que permita dosificar el fertilizante líquido de manera homogénea.

Las aplicaciones de los fertilizantes se realizaron mediante un sistema automatizado de riego. El cuadro 1 presenta las cantidades de nutrientes aplicados para las 72 plantas de tomate por tratamiento. La cantidad de fertilizante se calculó para un rendimiento esperado de 120 t/ha. Los cálculos se realizaron en base al estudio nutricional del tomate en condiciones de invernadero realizado por Quesada y Bertsch [5]. La cantidad de algas y el fertilizante suplementado resultaron en una paridad estequiométrica con el tratamiento químico.

Cuadro 1. Cantidades totales de los fertilizantes a aplicar por tratamiento (72 plantas por tratamiento).

	Fert. químico (g)	Fert. suplementado con alga (g)
Nitrato de amonio	7477	6753,6
Sulfato de magnesio	2707	180
Ácido bórico	43	43,2
Fosfato monopotásico	698	201,6
Nitrato de potasio	4183	2088
Nitrato de calcio	5472	5472
Alga	0	7213

Durante el desarrollo de las plantas, se evaluó varias variables, todas ellas de manera semanal. El índice de área foliar se midió con la aplicación Viticanopy de la Universidad de Adelaide. Para la altura de la planta se tomó la medida desde la base de la planta hasta el ápice. Además, se contó el número de hojas.

Se realizó un análisis químico foliar durante la semana 8 después de la siembra. Se tomó una muestra de un total de 30 hojas por tratamiento. El tejido que se envió a analizar fueron las hojas más jóvenes completamente expandidas. Las muestras fueron analizadas por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. Por otro lado, para determinar el rendimiento, se pesaron los frutos durante toda la etapa de cosecha de tomate.

Para evaluar la calidad del fruto se evaluó el color, firmeza, vida en anaquel y contenido de sólidos solubles. Para el color, se empleó un colorímetro ColorTech-PCM. A cada fruto de tomate se le tomaron dos lecturas, una a cada lado del fruto en la línea ecuatorial. Las lecturas se hicieron a los días 1, 6, 13 y 17 después de la cosecha. Para cada día se tomó una muestra de 8 tomates por tratamiento para realizar estas mediciones.

La Firmeza del fruto fue evaluada con un texturómetro TAXTplus. La firmeza del fruto se determinó a partir de la resistencia a la penetración en la línea ecuatorial, a una velocidad de 1mm/s, fuerza de 20g y distancia de 25mm. Para determinar este parámetro se tomó una muestra de 8 tomates por tratamientos, a los cuales se les midió la firmeza. Estos datos fueron recolectados en el transcurso de 13 días, tomando mediciones al día 1, 5, 9 y 13 después de la cosecha.

El contenido de sólidos solubles se midió triturando y se separó la pulpa del jugo. El jugo se exprimió del fruto, se tomaron dos gotas y se realizaron medidas de grados Brix utilizando un refractómetro digital marca Luzeren. El contenido de sólidos solubles se midió a los días 1, 6, 13 y 17 después de la cosecha. Para cada día se tomaron mediciones de una muestra de 8 tomates por tratamiento.

Análisis estadístico

A todos los datos recolectados para cada variable se les realizó una prueba de Shapiro-Wilk para el análisis de la normalidad de los datos y la prueba F para determinar la homogeneidad de las varianzas. Para las variables que cumplieron con este supuesto, se les procedió a realizar un análisis de varianzas mediante la prueba al 95% de confianza que es equivalente a la prueba T-Student para dos muestras independientes. En el caso de las variables cuyos datos carecieron de una tendencia normal y varianzas homogéneas, se utilizó una prueba de estadística no paramétrica. Para estos casos se utilizó la prueba H de Kruskal-Wallis para corroborar si existen diferencias significativas entre tratamientos a un 95% de confianza, que es equivalente a la prueba Mann Whitney U.

Resultados

El índice de área foliar revela en buena parte el bienestar de la planta, su desarrollo y el potencial para producir frutos [6]. El área foliar no mostró diferencias entre los tratamientos. A pesar de que las algas tienen elementos esenciales que nutren a las plantas, su materia orgánica primeramente debe descomponerse para luego estar disponibles [7]. Con lo cual, los nutrientes disponibles para el tratamiento con suplementación de algas fueron insuficiente para que los dos tratamientos se comportaran de igual manera (figura 1).

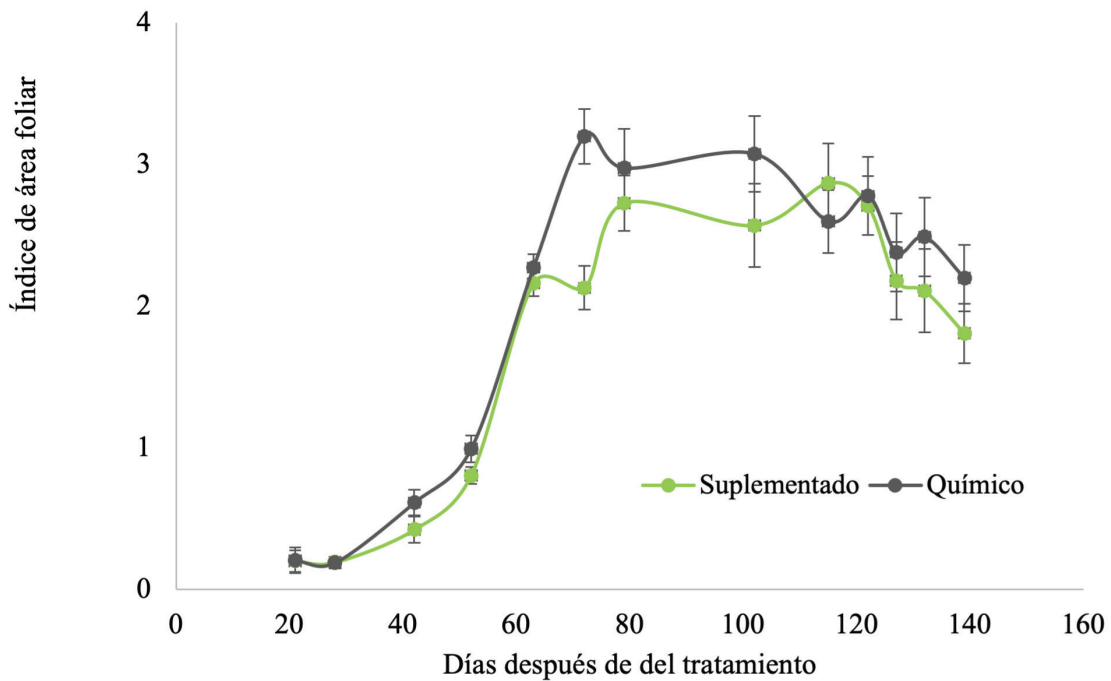


Figura 1. índice de área foliar después del primer día de trasplante. n=30

A medida que la planta creció, aumentó su biomasa y área foliar, por lo tanto, pudo aumentar las tasas fotosintéticas [8]. Durante las etapas de floración y producción de frutos es cuando se producen cambios marcados en la translocación de nutrientes. Aquí la absorción y translocación de nutrientes como el nitrógeno, potasio y calcio a los frutos es determinante para el rendimiento del cultivo.

Altura y número de hojas

La altura y número de hojas fueron tomadas semanalmente durante el periodo. No hubo diferencias significativas en número de hojas ni en la altura de las plantas al comparar los dos tratamientos. Esto puede deberse a que, durante el periodo vegetativo de la planta, el tomate requiere principalmente nutrientes como el nitrógeno, potasio, fósforo, calcio y magnesio. El nitrógeno es importante para la síntesis de clorofila durante la fotosíntesis, ya que influye en el crecimiento de las raíces, tallo y el desarrollo de las hojas [9].

Análisis químico foliar

A la semana 8 del cultivo se muestrearon hojas de ambos tratamientos para un análisis químico completo. Nutrientes como nitrógeno, hierro y manganeso tuvieron algunas diferencias en su porcentaje para el tratamiento químico en comparación al suplementado. Del cuadro 2 y 3 se calcula que el régimen de fertilización suplementado consistió en un 90% sales inorgánicas y un 9,7% de fertilizante orgánico de algas.

Para el nitrógeno la muestra foliar del tratamiento suplementado tuvo un 8,5% menos que el químico ($4,65/5,08 \times 100 = 8,5\%$). Este 8,5% es muy cercano a la diferencia en el aporte orgánico del tratamiento suplementado. Por este motivo se podría asumir que aproximadamente un 1,2% del nitrógeno orgánico proveniente del alga pudo ser mineralizado y aprovechado por las plantas. El restante N aportado por las algas aún no estaría en forma de nitratos o amonio.

Cuadro 2. Análisis químico foliar para el tratamiento químico y algas suplementado.

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
	%						mg/kg				
Fertilizante químico	5.1	0.22	3.28	1.71	0.27	0.74	148.7	3.06	12.8	127.8	157.3
Algas + fertilizante químico	4.7	0.23	3.12	2.38	0.27	0.71	303.3	4.56	14.6	257.4	215.7

El contenido de hierro hubo una diferencia en mg/kg de 154. Esto puede deberse al alto contenido en hierro (4537 mg/kg) que contiene el alga. En el caso del manganeso se presenta una situación similar donde el tratamiento suplementado obtuvo una mayor concentración en comparación al químico. Cabe destacar que las concentraciones foliares estuvieron dentro de los rangos óptimos para el cultivo.

Peso del fruto

Durante el último mes del cultivo se realizó la cosecha de los frutos de cada planta de tomate y se tomó el peso de cada fila según su tratamiento. Estos frutos se clasificaron en peso total, frutos buenos y dañados, siendo los frutos dañados aquellos afectados por una infección o deficiencia de nutrientes.

El peso por planta para el tratamiento químico fue de 3,4 Kg. Para el tratamiento suplementado fue de 1,9 Kg/planta. Esto pudo deberse a que los nutrientes contenidos en la formulación de los fertilizantes inorgánicos están disponibles de inmediato y no necesita la descomposición [7]. Los fertilizantes solubles tienen la composición química que las raíces absorben y es por ello, que pueden ser absorbidos de inmediato. Por otro lado, los nutrientes presentes en la materia orgánica se liberan gradualmente al medio y requieren de microorganismos descomponedores. Durante este proceso de descomposición, parte de los nutrientes se inmovilizan y podrían provocar una deficiencia nutricional en el cultivo [7]. Este efecto puede ser más notorio en cultivos estacionales como el tomate, cuyo ciclo dura de 3 a 4 meses [10]. Por lo tanto, el rendimiento del tratamiento químico, en comparación con el orgánicos, puede deberse a la diferencia en disponibilidad de nutrientes [11].

Las algas tienen un efecto fitoestimulador y fitoelicitador sobre el cultivo de tomate. Las moléculas elicitoras presentes en los fertilizantes de algas pueden estimular el mecanismo de defensa de la planta [12]. Por ende, le confiere una resistencia inducida de amplio espectro contra virus, bacterias, nematodos y hongos. Dentro de estas moléculas se pueden encontrar glicoproteínas, lípidos, proteínas y polisacáridos.

Cuadro 3. Producción total de frutos de tomate, frutos buenos, dañados y porcentaje de pérdida de frutos de tomate para cada tratamiento.

Tratamiento	Peso fruto sanos (kg)	Peso dañado (kg)	Peso total (kg)	% pérdida de cosecha	Diferencia en rendimiento (%)
Químico	3,30	0,18	3,48	27%	29,9
Suplementado	1,82	0,07	1,89	19%	

Las plantas fertilizadas únicamente con sales inorgánicas tuvieron un 30% más de frutos perdidos en comparación al tratamiento suplementado con Alga 18. Esto ocurre por las moléculas bioactivas presentes en los fertilizantes de algas ayudan a la planta mejorar su respuesta inmune ante estrés biótico y abiótico. Además, las plantas del tratamiento suplementado produjeron una menor cantidad de frutos, así los asimilados de la planta se distribuyeron en una menor cantidad de tomate, resultando estos con menos daños o defectos [13].

Calidad de los frutos

El color de los frutos se midió con un colorímetro ColorTEC – PCM. Para el tomate es común utilizar el coeficiente a/b como indicador de color y maduración, aumentando su valor a medida que se va desarrollando el color rojo del fruto [14].

El índice de color rojo (a) y el índice de color amarillo (b) siguieron una tendencia similar para ambos tratamientos. Estos índices oscilaron entre -1412 – 407 y 668 – 1382 para el tratamiento suplementado, respectivamente (figura 2). Mientras que los índices del tratamiento químico oscilaron entre -508 – 453 y 561 – 1195, respectivamente. En ambos tratamientos se da un aumento del parámetro a y un descenso en los valores de b, demostrando el proceso de maduración del tomate. Siendo esta interacción entre ambos parámetros un indicio del consumo de clorofila y producción de pigmentos rojos-amarillos, como los carotenoides [11].

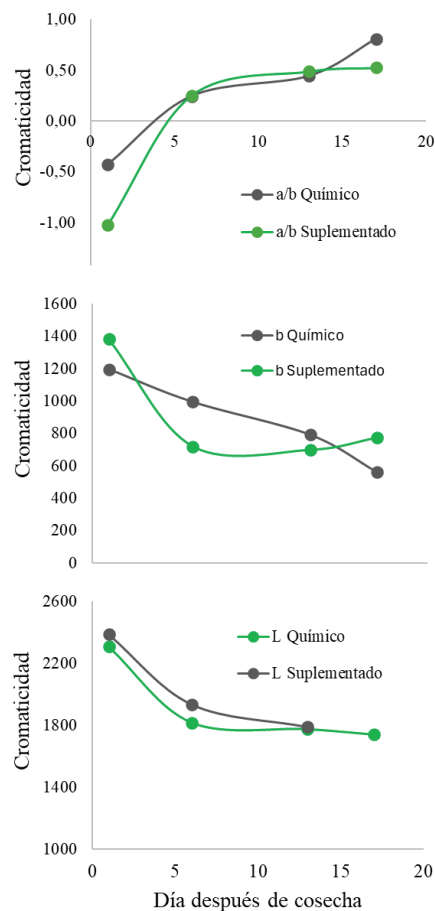


Figura 2. Desarrollo de valores cromáticos L, a y b para los frutos de tomate por tratamiento según día después de cosecha. n=10

Firmeza del fruto

La firmeza del fruto de tomate es un parámetro de calidad importante, ya que esta favorece la vida en anaquel del producto. Este parámetro está relacionado a la turgencia, tamaño celular y estructura de la membrana celular del tomate [15]. Los datos de firmeza se obtuvieron después de la cosecha y se midieron 8 tomates por tratamiento. La resistencia fue de 3214 en el suplementado y de 3205 en el químico sin diferencias.

Sin embargo, se ha reportado que las algas tienen el potencial para mejorar la firmeza del fruto de tomate. Esto puede deberse al potasio presente en las algas, el cual fomenta la producción y transporte de azúcares, así como la síntesis de pigmentos como el licopeno. También pueden influir en la estructura celular del tomate, lo que mejora la firmeza del fruto [16].

Sólidos solubles

Los datos para el tratamiento químico oscilaron entre 3,8 y 4,7 °Brix, mientras que los frutos del tratamiento suplementado estuvieron entre 4,4 y 5,5 °Brix por ello, no se hallaron diferencias estadísticas entre los tratamientos. Para todas las mediciones de todos los días los frutos de aquellas plantas bajo una suplementación orgánica obtuvieron mejores resultados en contenido de sólidos solubles. Lo cual significa que las plantas suplementadas con algas produjeron frutos de tomate con mayor contenido de azúcares. Pequeños cambios en esta variable pueden significar que los frutos se destinen para ser procesados en subproductos, como salsas, o que se comercialicen para su consumo fresco [17].

Cuadro 4. Promedio de contenido total de sólidos solubles de los frutos de tomate de los tratamientos de fertilización química y alga suplementada después de 1, 6, 13 y 17 días de cosecha.

Día de cosechado	Sólidos solubles (°Brix)			
	1	6	13	17
Suplementado	5,5	4,5	4,4	5,3
Químico	4,7	4,6	3,8	4,4

Algunos estudios han logrado aumentar hasta un 21% el contenido de sólidos solubles en frutos de tomate al suplementar con extractos de *Ascophyllum nodosum* [18]. Esta diferencia en comparación a una fertilización meramente química puede deberse a una mayor salinidad en el sustrato. A mayor salinidad se da un mayor estrés oxidativo que afecta a los frutos de tomate. Como consecuencia los frutos intentan reducir el potencial osmótico y facilitar la absorción de nutrientes, acumulando moléculas orgánicas como azúcares simples en ellos [19].

En el caso de los extractos es probable que se den diferencias más marcadas en el crecimiento del cultivo debido a que sus nutrientes están más disponibles, en comparación una fertilización con materia orgánica de la misma alga. Debido a que la materia orgánica del alga tiene que descomponerse antes en nutrientes asimilables por las plantas [7]. A esto podría atribuirse las pequeñas diferencias no significativas en sólidos solubles obtenidas entre el tratamiento suplementado y químico.

Vida en anaquel

La vida en anaquel es un parámetro que tiene influencia directa en la decisión de compra de los consumidores. La maduración del fruto a lo largo del tiempo conlleva a una pérdida de firmeza del fruto debido a pérdidas de agua y degradación de la membrana celular del tomate [20].

Se encontró que hubo cambios leves en la fuerza a la penetración del fruto, siendo la diferencia más grande al día 5 con 228 g/mm de diferencia entre tratamientos. Tampoco se sigue una tendencia marcada de los datos, siendo los datos del día 1 y 13 mayores para el tratamiento suplementado, y los días 5 y 9, los datos fueron mayores para el tratamiento químico.

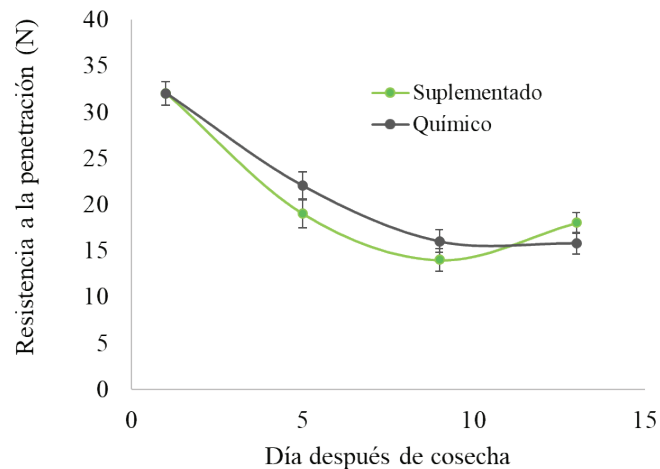


Figura 3. Resistencia a la penetración (g/mm) de los frutos de tomate según tratamiento y día después de cosecha. n=8

Existió esta tendencia similar entre tratamientos para la resistencia a la penetración del fruto. Sin embargo, algunos autores han notado diferencias en los frutos de tomate al utilizar extractos de alga. Estos extractos contienen más nutrientes biodisponibles para la planta, en comparación a fertilizantes elaborados a partir de la materia orgánica del alga [7]. La maduración de los frutos de tomate se da por la conversión de ACC (1-aminociclopropano-1-ácido carboxílico) a etileno. Se ha reportado que *Ascophyllum nodosum* contiene antioxidantes, aminoácidos y azúcares que ayudan a evitar la pérdida de firmeza del fruto, al inhibir las enzimas responsables de la producción de etileno.

Conclusiones

El alga aporta nutrientes a las plantas, sin embargo estos no están disponibles con la misma inmediatez que las sales químicas. Los sistemas de riego convencionales se obstruyen con facilidad debido al tamaño y crecimiento de las algas. En cuanto al rendimiento, la producción total del tratamiento de fertilización química fue mayor que el suplementado. En cuanto a sabor del fruto, el tratamiento suplementado fue más dulce que el químico.

Recomendaciones

La aplicación de algas podría conllevar la sustitución de goteros que impidan la obstrucción de los mismos. Las algas son aprovechadas por microorganismos, que a su vez liberan al suelo los nutrientes esenciales. Esto lleva un tiempo por lo que la disponibilidad de los nutrientes no es inmediata. Por ello, se sugiere analizar la aplicación del alga en los sustratos tiempo antes de sembrar las plántulas.

Agradecimientos

Agradecemos al Centro de Investigación y Extensión en Gestión Agroempresarial (CIGA), de la Escuela de Agronegocios. A Wendy Rivera Jiménez por su colaboración en el mantenimiento del ensayo.

Referencias

- [1] M. Zargar *et al.*, "Survey of biological components efficiency on safety and productivity of different tomato cultivars," *Res. Crops*, vol. 18, no. 2, p. 279, 2017, doi: 10.5958/2348-7542.2017.00048.1.
- [2] López Marín, L. M., "Manual técnico del cultivo del tomate: *Solanum Lycopersicum*." 2017. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11324/3143>
- [3] J. Ahlawat, A. R. Sehrawat, R. Chaudhary, and D. Pandey, "Ascophyllum nodosum: a Potential Substitute for Synthetic Hormones for Tissue Culture Propagation of *Capparis decidua* (Forsk) Edgew," *Regen. Eng. Transl. Med.*, vol. 8, no. 1, pp. 145–151, Mar. 2022, doi: 10.1007/s40883-021-00215-0.
- [4] N. Verma *et al.*, "Potential Use of *Ascophyllum nodosum* as a Biostimulant for Improving the Growth Performance of *Vigna aconitifolia* (Jacq.) Marechal," *Plants*, vol. 10, no. 11, p. 2361, Nov. 2021, doi: 10.3390/plants10112361.
- [5] Quesada-Roldán, G., y Bertsch-Hernández, F., "Fertirriego en el rendimiento de híbridos de tomate producidos en invernadero," *Agronomía Mesoamericana*, vol. 23, no. 1, pp. 01–11, Mar. 2012.
- [6] C. Mendoza-Pérez, W. Ojeda-Bustamante, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, H. Flores-Magdaleno, and Colegio de Postgraduados, "Estimación de índice de área foliar y rendimiento de chile poblano cultivado en invernadero," *Ing. Agríc. Biosist.*, vol. 9, no. 1, pp. 37–50, Jun. 2017, doi: 10.5154/r.inagbi.2017.04.009.
- [7] Sharma, A. and Chetani, R., "A review on the effect of organic and chemical fertilizers on plants," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, pp. 677–680, 2017.
- [8] J. A. Monte, D. F. D. Carvalho, L. O. Medici, L. D. B. D. Silva, and C. Pimentel, "Growth analysis and yield of tomato crop under different irrigation depths," *Rev. Bras. Eng. Agríc. E Ambient.*, vol. 17, no. 9, pp. 926–931, Sep. 2013, doi: 10.1590/S1415-43662013000900003.
- [9] I. Bodale, G. Mihalache, V. Achiței, G.-C. Teliban, A. Cazacu, and V. Stoleru, "Evaluation of the Nutrients Uptake by Tomato Plants in Different Phenological Stages Using an Electrical Conductivity Technique," *Agriculture*, vol. 11, no. 4, p. 292, Mar. 2021, doi: 10.3390/agriculture11040292.
- [10] A. Bustamante, G. Reybet, P. Bucki, A. Suarez, and A. Escande, "EFECTO DE LA SOLARIZACION SOBRE MALEZAS DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.) EN EL ALTO VALLE RÍO NEGRO Y NEUQUÉN," *Agro Sur*, vol. 31, no. 2, pp. 15–23, Dec. 2003, doi: 10.4206/agrosur.2003.v31n2-02.
- [11] B. S. De Paula *et al.*, "Algae-based biostimulants increase yield and quality of mini tomatoes under protected cultivation," *JSFA Rep.*, vol. 2, no. 4, pp. 155–160, Apr. 2022, doi: 10.1002/jsf2.36.
- [12] O. Ali, A. Ramsbhag, and J. Jayaraman, "Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment," *PLOS ONE*, vol. 14, no. 5, p. e0216710, May 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0216710.
- [13] R. M. Hernández-Herrera *et al.*, "Seaweed Extract Improves Growth and Productivity of Tomato Plants under Salinity Stress," *Agronomy*, vol. 12, no. 10, p. 2495, Oct. 2022, doi: 10.3390/agronomy12102495.
- [14] Saad, A. M., Ayman Ibrahim, and Nazeer El-Biale, "Internal quality assessment of tomato fruits using image color analysis," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 339–352, 2016.
- [15] P. Jalali, H. R. Roosta, M. Khodadadi, A. M. Torkashvand, and M. G. Jahromi, "Effects of brown seaweed extract, silicon, and selenium on fruit quality and yield of tomato under different substrates," *PLOS ONE*, vol. 17, no. 12, p. e0277923, Dec. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0277923.
- [16] K. M.-P. Chanthini *et al.*, "The Macroalgal Biostimulant Improves the Functional Quality of Tomato Fruits Produced from Plants Grown under Salt Stress," *Agriculture*, vol. 13, no. 1, p. 6, Dec. 2022, doi: 10.3390/agriculture13010006.
- [17] D. Bilalis *et al.*, "Effects of organic and inorganic fertilization on yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)," *Folia Hortic.*, vol. 30, no. 2, pp. 321–332, Dec. 2018, doi: 10.2478/fhort-2018-0027.

- [18] M. Ahmed, H. Ullah, A. Attia, R. Tisarum, S. Cha-um, and A. Datta, "Interactive Effects of Ascophyllum nodosum Seaweed Extract and Silicon on Growth, Fruit Yield and Quality, and Water Productivity of Tomato under Water Stress," *Silicon*, vol. 15, no. 5, pp. 2263–2278, Apr. 2022, doi: 10.1007/s12633-022-02180-x.
- [19] López-Martínez, J. D, Vázquez-Díaz, D. A, Esparza-Rivera, J. R, García-Hernández, J. L, Castruita-Segura, M. A, and Preciado-Rangel, P, "Yield and nutraceutical quality of tomato fruit produced with nutrient solutions prepared using organic materials," *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 39, no. 4, pp. 409–414, 2016.
- [20] N. Klaochanpong, C. Puttanlek, V. Rungsardthong, S. Puncha-arnon, and D. Uttapap, "Physicochemical and structural properties of debranched waxy rice, waxy corn and waxy potato starches," *Food Hydrocoll.*, vol. 45, pp. 218–226, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.11.010.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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

Evaluación de un conjunto de unidades de toma de decisiones brasileñas mediante Análisis Envolverte de Datos

Evaluation of a set of brazilian decision-making units using Data Envelopment Analysis

Pedro Vieira Souza Santos¹, Lucas di Paula Gama dos Santos², Letícia de Souza Lima³







Fecha de recepción: 29 de junio, 2025

Fecha de aprobación: 10 de octubre, 2025

Vieira Souza Santos, P; di Paula Gama dos Santos, L; de Souza Lima, L. Evaluación de un conjunto de unidades de toma de decisiones brasileñas mediante Análisis Envolverte de Datos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 74-84.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8008>



- 1 Universidade Federal do Vale do São Francisco. Brazil.
 pedrovieirass@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-9802-506X>
- 2 Universidade Federal do Vale do São Francisco. Brazil.
 dipaula_9@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-4985-9508>
- 3 Universidade Federal do Vale do São Francisco. Brazil.
 leticiasouzaestagio@gmail.com
 <https://orcid.org/0009-0007-1019-555X>

Palabras clave

Eficiencia; logística; operaciones; gestión.

Resumen

La logística abarca una amplia gama de operaciones importantes para la transferencia de bienes, servicios e información. Debido a esta complejidad inherente al sector, se estudian y proponen técnicas y métodos para contribuir a la mejora continua y al desarrollo de nuevos entornos para operaciones eficientes y productivas. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar y comparar la eficiencia operativa de las empresas logísticas que operan en el centro de yeso de Araripe, ubicado en el noreste de Brasil, mediante el Análisis Envolvente de Datos. Considerando los datos asociados a los indicadores de desempeño del BSC recopilados para el análisis, se optó por utilizar el modelo BCC (propuesto por Banker et al., 1984) orientado a la entrada. Con base en los datos introducidos en el software y considerando el modelo BCC-entrada, se creó la frontera de eficiencia para la visualización gráfica y el análisis del desempeño de las empresas de la muestra. Se obtuvieron datos sobre la eficiencia clásica, la eficiencia invertida, así como la eficiencia compuesta y la normalizada. En el caso de los insumos y productos considerados, la DEA puede contribuir a la gestión desde un nuevo enfoque a través de la formulación de políticas de eficiencia y el aprendizaje de las mejores prácticas.

Keywords

Efficiency; logistics; operations; management.

Abstract

Logistics encompasses a wide range of operations important for the transfer of goods, services, and information. Due to this inherent complexity of the sector, techniques and methods are studied and proposed to contribute to continuous improvement and the development of new environments for efficient and productive operations. Therefore, the objective of this study was to analyze and compare the operational efficiency of logistics companies operating in the Araripe gypsum center, located in northeastern Brazil, using Data Envelopment Analysis. Considering the data associated with the BSC performance indicators collected for the analysis, the BCC model (proposed by Banker et al., 1984) was chosen, which is input-oriented. Based on the data entered into the software and considering the BCC-input model, the efficiency frontier was created for graphical visualization and analysis of the performance of the sample companies. Data were obtained on classical efficiency, inverted efficiency, as well as compound and normalized efficiency. In the case of the inputs and outputs considered, the DEA can contribute to management from a new perspective through the formulation of efficiency policies and learning from best practices.

Introducción

Una de las ramas altamente dinámicas y, en consecuencia, que requiere estrategias operativas es la logística. La expresión logística se utiliza de forma más amplia para referirse a los procesos de coordinación y movimiento de recursos (personas, materiales, inventario y equipos en general) desde un lugar hasta el destino de almacenamiento deseado [1][2]. En este contexto, un área de la logística en la que se hace énfasis es la distribución, es decir, el sector que realiza la actividad de gestionar el flujo de tareas que permite la entrega de mercancías a los respectivos clientes dentro del plazo determinado [3][4].

La logística, como actividad operativa y estratégica, evoluciona constantemente y exige acciones efectivas para gestionar el flujo de productos o servicios, desde el punto de origen hasta el punto de consumo [5]. La logística abarca una amplia gama de operaciones importantes para la transferencia de bienes, servicios e información. Debido a esta complejidad inherente al sector, se estudian y proponen técnicas y métodos para contribuir a la mejora continua y al desarrollo de nuevos entornos para operaciones eficientes y productivas [6][7].

En la región de Araripe, ubicada en el estado de Pernambuco, noreste de Brasil, uno de los principales productores de yeso del país, uno de los obstáculos que enfrentan las empresas locales está relacionado con la ineficiencia del sistema de transporte y los costos de flete, además de las dificultades en la gestión de las operaciones logísticas [8]. Dado que el segmento logístico opera con operaciones estandarizadas, el proceso es susceptible de evaluación de desempeño basada en la eficiencia [9][10].

Para esto, se pueden utilizar algunas metodologías, una de las cuales es el Análisis Envolvente de Datos (DEA). El método DEA se caracteriza por ser no paramétrico y su objetivo es medir la eficiencia relativa de un conjunto de instituciones empresariales, denominadas toma de decisiones homogéneas (DMU - *Decision-Making Units*), con variables de entrada y salida [11].

El método DEA permite enfocar el análisis en la entrada o la salida. En otras palabras: Orientado a la entrada: cuando el objetivo es definir el nivel mínimo posible de uso de recursos, manteniendo los mismos resultados; Orientado a la salida: cuando el objetivo es estimar el nivel máximo posible de salida, manteniendo los niveles de entrada fijos [12]. Dicho esto, se trata de un enfoque no paramétrico, capaz de definir una frontera de eficiencia y medir la eficiencia real de cada unidad de medida de la densidad (DMU) en relación con el conjunto muestral y esta frontera. Es una herramienta útil para identificar posibles mejores prácticas de gestión, así como para indicar que empresas deberían mejorar sus procesos internos [13]. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar y comparar la eficiencia operativa de las empresas logísticas que operan en el centro de yeso de Araripe, ubicado en el noreste de Brasil, mediante el Análisis Envolvente de Datos.

Materiales y métodos (metodología)

La investigación se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos (Figura 1):

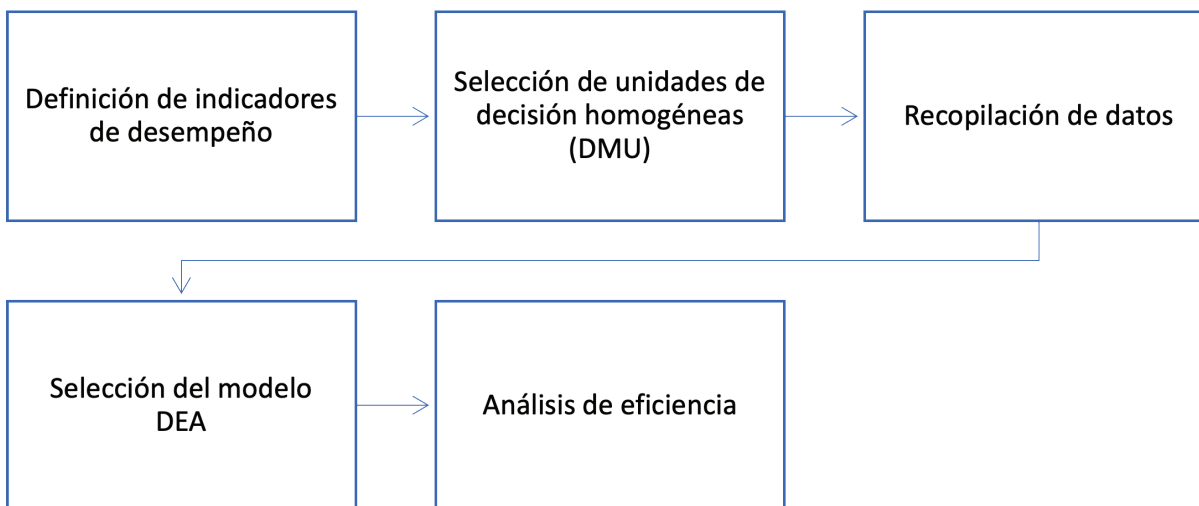


Figura 1. Etapas de la investigación.

- Definición de indicadores de desempeño relevantes para el escenario de las operaciones logísticas: en esta fase inicial, se definieron métricas para los procesos internos relevantes para evaluar la eficiencia en las empresas de logística mediante el método del *Balanced Scorecard* (BSC). La elección de los indicadores se basó en los estudios publicados en la literatura científica, destacándose la investigación de [16] y [17]. Se enumeraron doce (12) indicadores útiles para evaluar el desempeño en este tipo de operaciones. De estos, seis (6) son entradas y seis (6) son salidas;
- Selección de unidades de decisión homogéneas (DMU): para someterse al método DEA, las unidades operativas deben tener las mismas características operativas; es decir, la capacidad de producción, el producto y el proceso utilizados, por ejemplo, deben ser similares. Por lo tanto, mediante un cuestionario sobre los datos operativos de las organizaciones, se pudo identificar a las empresas que cumplen con el requisito. De las 34 empresas contactadas, trece (13) se ajustan al perfil homogéneo y, por lo tanto, conforman la muestra seleccionada para este análisis;
- Recopilación de datos: los datos numéricos inherentes a las doce variables de entrada y salida se obtuvieron conjuntamente mediante un formulario electrónico enviado a las empresas por correo electrónico. Los valores se refieren al promedio del segundo semestre de 2024;
- Selección del modelo DEA: considerando los datos asociados a los indicadores de desempeño del BSC recopilados para el análisis, se optó por utilizar el modelo BCC [14] orientado a la entrada;
- Análisis de eficiencia: con base en los datos introducidos en el software y considerando el modelo BCC-entrada, se creó la frontera de eficiencia para la visualización gráfica y el análisis del desempeño de las empresas de la muestra. Se obtuvieron datos sobre la eficiencia clásica, la eficiencia invertida, así como la eficiencia compuesta y la normalizada.

Resultados

Las empresas objeto del estudio de eficiencia se ubican en la región de Araripe, en el estado de Pernambuco (PE), al noreste de Brasil. Estas organizaciones operan en el mercado de la logística de distribución entre 5 y 31 años, y todas siguen la premisa de homogeneidad propuesta por el método DEA. En el modelo BCC DEA con dirección de datos de entrada, se define un Problema de Programación Lineal (PPL), construido según la función objetivo indicada por 1, complementada con las ecuaciones 2 y 3.

$$\text{Min } (\omega) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\omega x_{i0} - \sum_{k=1}^n x_{ik} \text{ com } \lambda_k \geq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$-y_{j0} + \sum_{k=1}^n y_{jk} \text{ com } \lambda_k \geq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Aún se cumplen las condiciones expresadas por (4) e (5):

$$\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1 \quad (4)$$

$$\lambda_k \geq 0 \forall k \quad (5)$$

En vista de este problema matemático, los elementos marcados con λ se definen como los porcentajes de representación entre las empresas de la muestra homogénea analizada (DMU) y sus grupos [15]. Es importante destacar que los valores de los componentes λ deben tener una suma igual a uno (1,0) y también deben ser distintos de cero, es decir, mayores o iguales a cero (0), como lo indican las restricciones 4 y 5.

Debe destacarse que los indicadores utilizados en esta investigación siguen la base teórica sobre el tema. En este sentido, se definieron como métricas relevantes para el caso:

- Entregas a tiempo;
- Daños;
- Atención de pedidos;
- Retornos y devoluciones;
- Tiempo de ciclo del pedido;
- Exactitud de la previsión;
- Obsolescencia del inventario;
- Costo de flete de recepción;
- Costo de movimiento;
- Costo del capital en inventario – productos terminados;
- Rotación de inventarios; y
- Factor de ocupación de la flota.

La elección de estos indicadores se fundamenta, además, en la posibilidad de una medición estandarizada entre todas las unidades de decisión, criterio base para atender el cálculo DEA. El modelo adoptado en esta evaluación, orientado al input, presenta algunas características favorables al escenario de las empresas analizadas.

Este enfoque se adecua a contextos en los que la reducción de recursos (insumos) constituye el objetivo principal, manteniendo el nivel de producción. En este caso, las entradas vinculadas a la directriz financiera del BSC, traducida en costos, representan el punto crucial de la evaluación y de la adecuación del modelo. Además, esta técnica permite identificar las unidades más eficientes, que servirán como referencia para aquellas que son ineficientes, indicando el nivel de reducción al que debe someterse cada insumo.

El modelo BCC se comporta como una forma de eficiencia derivada de la división del modelo CCR en dos componentes: eficiencia técnica y eficiencia de escala. La medida relacionada con la eficiencia técnica (derivada del BCC) identifica el uso adecuado de los recursos a la escala de operación de la DMU. Por otro lado, la eficiencia de escala es igual al cociente entre la eficiencia BCC y la eficiencia CCR, e indica una medida de la distancia de la DMU analizada respecto a una unidad ficticia que opera con el tamaño de escala más productivo [18].

Por lo tanto, con los datos sometidos al modelo matemático, el índice obtenido inicialmente fue la puntuación de eficiencia clásica (ω). Mediante los cálculos del modelo de entrada BCC, se observan los siguientes resultados de puntuación (ω), en orden alfabético, según el Cuadro 1:

Cuadro 1. Score (ω) de eficiencia generado por DMU.

DMU	Score (ω)	Score (ω) en %
LOG_A	0,366	36,55
LOG_B	0,745	74,50
LOG_C	0,630	63,00
LOG_D	0,850	85,00
LOG_E	1,000	100,00
LOG_F	0,456	45,63
LOG_G	0,664	66,40
LOG_H	0,541	54,10
LOG_I	0,733	73,30
LOG_J	0,448	44,80
LOG_K	0,804	80,40
LOG_L	1,000	100,00
LOG_M	0,571	57,10

Las unidades de medida de eficiencia (DMU) LOG_E y LOG_L son las unidades de referencia, y una forma alternativa de visualizar este resultado es mediante la frontera circular de eficiencia, ilustrada en la Figura 2. En este gráfico, la línea exterior representa la eficiencia en su valor máximo (1,0), mientras que la línea central representa la eficiencia igual a cero (0). Se puede observar que la mayoría de las DMU se encuentran en el rango de 44 a 74 puntos porcentuales de la eficiencia clásica, o 0,44 y 0,74 respectivamente.

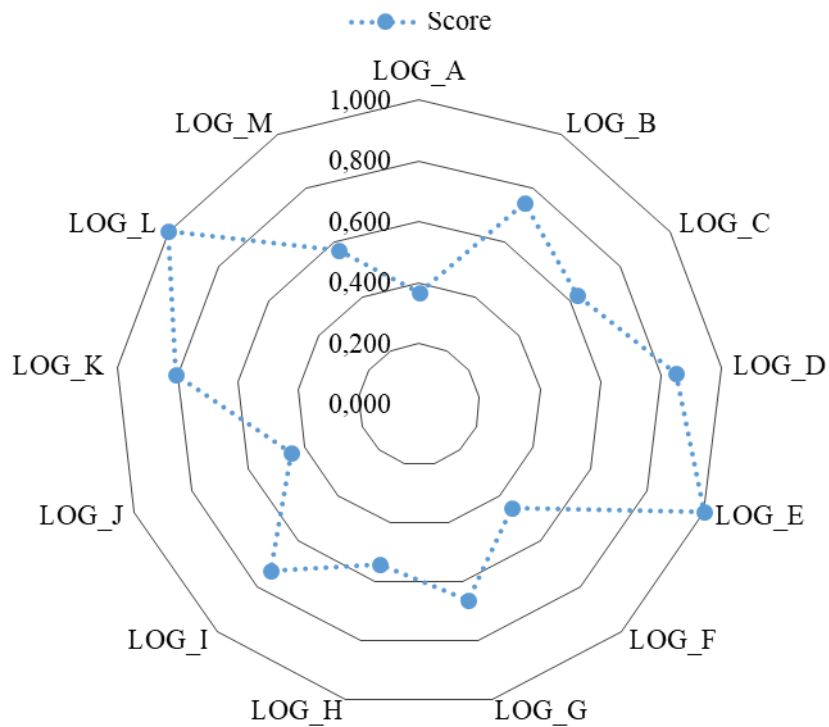


Figura 2. Frontera de eficiencia circular.

DMU LOG_E está ubicada en Araripina, y opera en el sector logístico desde hace 7 años. Por otro lado, DMU LOG_L, con sede en Trindade, desarrolla soluciones logísticas de distribución desde hace 9 años. Ambas empresas comparten la política de utilizar el número de vehículos de transporte (propios y subcontratados). En épocas de alta demanda, contratan empresas subcontratadas para el transporte del yeso a los puntos de consumo. Por lo tanto, los datos de entrada relativos a la capacidad de procesamiento (toneladas/mes) son similares, ya que el material procesado se distribuye mediante la estrategia de subcontratación de servicios.

Estos resultados corroboran la investigación publicada por [19], en la cual se identifican las DMU con menor índice de referencia, es decir, menor capacidad de benchmarking. No obstante, dichas ocurrencias sirven para proyectar las unidades ineficientes, sugiriendo valores óptimos para las variables, minimizando los insumos y maximizando los productos/servicios.

Sin embargo, para complementar la evaluación inicial de eficiencia, también se puede calcular la frontera de eficiencia invertida. Para ello, se invierten los datos de entrada y salida del modelo DEA original, lo que permite identificar las DMU con peores prácticas de gestión y las empresas con mejores prácticas en sentido contrario. El índice o puntuación de eficiencia invertida (Ω) calculado por DMU se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. – Scores de eficiencia invertida (Ω) para cada DMU.

DMU	Score (Ω)	Score (Ω) en %
LOG_A	0,422	42,20
LOG_B	0,215	21,50
LOG_C	0,844	84,40
LOG_D	0,369	36,90
LOG_E	0,741	74,10
LOG_F	0,502	50,20
LOG_G	1,000	100,00
LOG_H	0,366	36,60
LOG_I	0,466	46,60
LOG_J	0,852	85,20
LOG_K	0,630	63,00
LOG_L	1,000	100,00
LOG_M	0,674	67,40

Con la modificación propuesta, que consiste en invertir los datos de entrada y salida, se observa un cambio en los indicadores de eficiencia con respecto al índice clásico (ω). Este comportamiento es previsible, ya que se trata de una evaluación con la inversión de los indicadores, pero resulta útil para realizar otro cálculo: el de la eficiencia compuesta (δ). Este tipo de eficiencia se establece mediante el promedio de la eficiencia clásica (ω) con la eficiencia invertida (Ω). Con esta información, al final de la evaluación, se indicarán las unidades de medida de eficiencia (DMU) consideradas eficientes.

Para calcular la eficiencia compuesta, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia compuesta } (\delta) = [\omega + (1 - \Omega)] / 2.$$

En este caso, ω es el valor asociado a la eficiencia clásica y Ω es el coeficiente obtenido para la eficiencia invertida. Sin embargo, además, la eficiencia compuesta (δ) debe normalizarse; para él, el valor de cada eficiencia compuesta debe dividirse entre el valor más alto calculado de la eficiencia compuesta del grupo o muestra. El resultado final del cálculo de la eficiencia compuesta se presenta en lo Cuadro 3, así como su valor normalizado.

Con los resultados obtenidos para los cuatro tipos de eficiencia, la DMU LOG_B (1,00) puede identificarse como la empresa de referencia en relación con el conjunto de trece (13) DMU, en términos operativos. Desde otra perspectiva, se puede observar que la DMU LOG_J fue la que obtuvo el valor más bajo en Eficiencia Compuesta Normalizada (0,390). La empresa opera en el mercado desde hace 31 años, con sede física en Ipubi-PE. Esta información contribuye al debate sobre la correlación entre el tiempo de operación en el mercado y los resultados eficientes de las operaciones.

Cuadro 3. Conjunto total de eficiencias calculadas para cada DMU.

DMU	Eficiencia Clásica (ω)	Eficiencia Invertida (Ω)	Eficiencia Compuesta (δ)	Eficiencia Compuesta Normalizada (ECN)
LOG_A	0,366	0,422	0,472	0,617
LOG_B	0,745	0,215	0,765	1,000
LOG_C	0,630	0,844	0,393	0,514
LOG_D	0,850	0,369	0,741	0,968
LOG_E	1,000	0,741	0,630	0,823
LOG_F	0,456	0,502	0,477	0,624
LOG_G	0,664	1,000	0,332	0,434
LOG_H	0,541	0,366	0,588	0,768
LOG_I	0,733	0,466	0,634	0,828
LOG_J	0,448	0,852	0,298	0,390
LOG_K	0,804	0,630	0,587	0,767
LOG_L	1,000	1,000	0,500	0,654
LOG_M	0,571	0,674	0,449	0,586

En este caso, se observa que el tiempo de operación en el mercado no garantiza la eficiencia automática y que es necesario gestionar estratégicamente para mantener buenos resultados en términos de procesos internos. Dicho esto, el nuevo comportamiento de la frontera de eficiencia circular se presenta en la Figura 3.

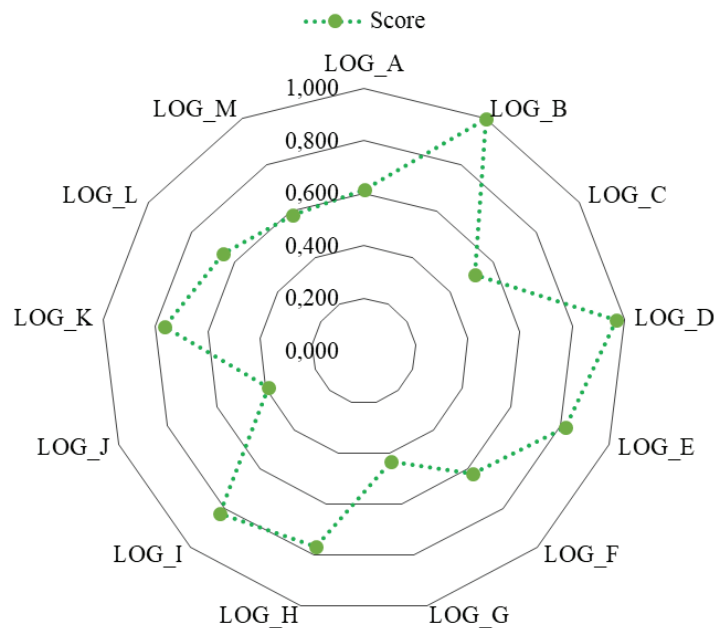


Figura 3. Frontera de eficiencia circular actualizada.

La unidad de gestión de la eficiencia (DMU) LOG_B se encuentra en la ciudad de Trindade, PE, y opera en el sector logístico desde hace 15 años. Si bien la evaluación de eficiencia clásica no lo indicó inicialmente, al calcular la eficiencia compuesta, se observó que la empresa destacaba eficazmente tanto en los datos de entrada como en las variables de salida. Cabe destacar que la empresa se centra en minimizar el tiempo de entrega de los pedidos y en asegurar el cumplimiento de la ruta planificada frente a la real (%); es decir, que se siga de acuerdo con el plan operativo. Ambos son indicadores considerados en el modelo de entrada BCC de la DEA, lo que podría haber contribuido al satisfactorio resultado de eficiencia.

El comportamiento de los datos en el conjunto de empresas seleccionadas amplía la discusión acerca de la calidad de las operaciones en el sector. Asimismo, [20] la posibilidad de integrar indicadores básicos vinculados al BSC para cuantificar la eficiencia operacional como un factor de salida, permite identificar ineficiencias y proponer mejoras orientadas.

El resultado final de la evaluación de eficiencia, que se muestra en la Tabla 5, muestra que el modelo DEA es adecuado para evaluar unidades con operaciones homogéneas, incluso si están geográficamente distantes, de modo que se pueden observar variaciones en los valores de eficiencia clásica en relación con los valores complementarios de la Eficiencia Compuesta Normalizada.

Los resultados encontrados en la investigación corroboran otros estudios publicados en la literatura sobre el tema. En este sentido, debe destacarse que, a partir de la metodología adoptada en el estudio, se constató que el enfoque propuesto con base en el Balanced Scorecard puede ser utilizado por diversas empresas con configuraciones operativas distintas; así como que es posible emplear los resultados como base para una reacción flexible y ágil ante las turbulencias del mercado, dado que permite a la empresa verificar su posicionamiento y redirigir sus esfuerzos, reforzando lo señalado en el estudio de Zago et al. [17].

Con base en el comportamiento de las unidades decisorias en el ranking de eficiencia, considerando los indicadores orientados a la entrada (input), las organizaciones pueden mejorar sus operaciones internas con foco en la mejora continua. Entre las ventajas de esta técnica aplicada a la operación de empresas del sector logístico, se destacan:

- Análisis de desempeño multidimensional: se basa en la evaluación simultánea de múltiples entradas y salidas, proporcionando evaluaciones de desempeño detalladas;
- Oportunidades de benchmarking: identificadas mediante comparaciones entre unidades decisorias que revelan las mejores prácticas;
- Identificación de ineficiencias: el Análisis Envolvente de Datos puede destacar las áreas que requieren mejoras;
- Flexibilidad: puede adaptarse fácilmente a diversos sectores y procesos de negocio.

Conclusiones

Aunque muchas empresas se centran exclusivamente en producir su combinación de productos y servicios para satisfacer las necesidades de sus clientes, si los artículos no llegan a ellos, la empresa fracasará y perderá eficiencia operativa. Por lo tanto, cuanto más eficiente sea la adquisición, manipulación, transporte y almacenamiento de las materias primas hasta su uso, mayor será la rentabilidad del negocio. La coordinación de recursos para la entrega, realizada por la logística de distribución, es esencial para la sostenibilidad del negocio; por lo tanto, el análisis de eficiencia está justificado y es relevante.

La propuesta aborda un enfoque no paramétrico y se ha utilizado ampliamente para definir fronteras de eficiencia y, por lo tanto, evaluar unidades de gestión de la eficiencia (DMU) homogéneas. Esta metodología permitió definir una frontera no paramétrica y medir la eficiencia de cada unidad en relación con esta frontera. En otras palabras, el enfoque DEA se comportó como una herramienta analítica para determinar el rendimiento efectivo de las empresas de logística.

La caracterización de la unidad de evaluación o DMU como un “tomador de decisiones” implica que tiene control sobre el proceso que emplea para convertir sus recursos en resultados. En otras palabras, gestiona las entradas y salidas. En el caso de los insumos y productos considerados, la DEA puede contribuir a la gestión desde un nuevo enfoque a través de la formulación de políticas de eficiencia y el aprendizaje de las mejores prácticas.

Se destaca aquí que la investigación se limitó a trece unidades decisorias (DMU). Este conjunto de empresas cumplió con el criterio de estandarización de las operaciones, es decir, fueron seleccionadas de acuerdo con el sector y los servicios prestados en el ámbito logístico. En función del tiempo dedicado al estudio y del acceso restringido a las demás empresas que también operan en la región, no fue posible involucrar un mayor número de unidades en la investigación.

Asimismo, el período destinado a la investigación estuvo orientado por la disponibilidad de los autores para la recolección y el tratamiento de los datos. Por ello, no fue posible extender el estudio por un período más prolongado ni involucrar un conjunto aún mayor de empresas. Por lo tanto, como sugerencia para investigaciones futuras, se propone realizar una nueva evaluación con las empresas participantes de este estudio, así como incluir nuevas unidades del sector.

Referencias

- [1] R.H. BALLOU. “Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial.” São Paulo: Editora Bookman, 2010.
- [2] B.S. FUGATE, J.T. MENTZER, T.P. STANK. “Logistics performance: efficiency, effectiveness and differentiation.” *Journal of Business Logistics*, vol. 31, no. 1, p. 43-62, 2010.

- [3] C. ATASEVEN, A. NAIR. "Assessment of supply chain integration and performance relationships: A meta-analytic investigation of the literature." *International Journal of Production Economics*, vol. 185, no. 1, p. 252-265, 2017.
- [4] P.V.S. SANTOS, E.C. SILVA. "Gestão estratégica da qualidade aplicada à redução de devoluções." *Navus - Revista de Gestão e Tecnologia*, vol. 9, no. 4, p. 30-48, 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.22279/navus.2019.v9n3.p55-68.819>
- [5] M.M.P. MARCHESINI, R.L.C. ALCÂNTARA. "Logistics activities in supply chain business process: A conceptual framework to guide their implementation." *The International Journal of Logistics Management*, vol. 27, no. 1, p. 6-30, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2014-0068>
- [6] D.J. BOWERSOX. "Supply chain logistics management." McGraw-Hill Higher Education, New York, NY, 2007.
- [7] P.V.S. SANTOS. "Aplicação do overall equipment effectiveness no sistema produtivo de uma vinícola." *Navus - Revista de Gestão e Tecnologia*, vol. 10, p. 01-14, 2020. Doi: <https://doi.org/10.22279/navus.2020.v10.p01-14.933>
- [8] P.V.S. SANTOS, A.V. FERRAZ, A.C.G.C. SILVA. "Utilização da ferramenta mapeamento de fluxo de valor (MFV) para identificação de desperdícios no processo produtivo de uma empresa fabricante de gesso." *Revista Produção Online*, vol. 19, no. 4, p. 1197-1230, 2019. Doi: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v19i4.3310>
- [9] A. YAZDANPARAST, I. MANUJ, S.M. SWARTZ. "Co-creating logistics value: a service dominant logic perspective." *The International Journal of Logistics Management*, vol. 21, no. 3, p. 375-403, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1108/09574091011089808>
- [10] P.V.S. SANTOS. "A introdução de tecnologias a favor da eficiência em operações logísticas: um estudo de caso no setor de serviços." *Navus - Revista de Gestão e Tecnologia*, vol. 9, no. 3, p. 55-68, 2019. Doi: <https://doi.org/10.22279/navus.2019.v9n3.p55-68.819>
- [11] S. N. HWANG, C. CHEN, Y. CHEN, H.S. LEE, P.D. SHEN. "Sustainable design performance evaluation with applications in the automobile industry: Focusing on inefficiency by undesirable factors." *Omega*, vol. 41, no. 3, p. 553-558, 2013.
- [12] C.M.C.F. FERREIRA, A. P. GOMES. "Introdução à análise envoltória de dados: teoria, modelos e aplicações." Viçosa, 2009.
- [13] M. LOTHGREN, M. TAMBOUR. "Bootstrapping the Data Envelopment Analysis Malmquist Productivity Index." *Applied Economics*, vol. 31, no. 4, p. 417-425, 1999. Doi: <https://doi.org/10.1080/000368499324129>
- [14] R. D. BANKER, A. CHARNES, W.W. COOPER. "Some models for estimating technical and scale inefficiency in data envelopment analysis." *Management Science*, vol. 30, p. 1078-1092, 1984.
- [15] G. PASCHALIDOU, E. STIAKAKIS, A. CHATZIGEORGIOU. "An Application of Data Envelopment Analysis to Software Quality Assessment." In: *Balkan Conference in Informatics, Proceedings...* BCI '13, 2013, Thessaloniki, Greece, September: 19 - 21, 2013.
- [16] J.M. KATO. "Avaliação de desempenho de sistemas logísticos através do Seis Sigma e Balanced Scorecard". *Revista Da FAE*, vol. 06, no. 02, 2017.
- [17] C.A. ZAGO, L.F. ABREU, C. Grzebieluckas, A.C. BORNIA. "Modelo de avaliação de desempenho logístico com base no balanced scorecard (bsc): proposta para uma pequena empresa", *Revista da Micro e Pequena Empresa*, vol. 02, no. 01, p.19-37, 2008. <https://doi.org/10.6034/38>
- [18] P.V.S. SANTOS, A.V. FERRAZ, T.R.N. CLEMENTE. "Integração do balanced scorecard com o data envelopment analysis para avaliação de desempenho de empresas do apl do gesso". *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, vol. 17, no. 32, 2025. <https://doi.org/10.5007/2175-8018.2025.e108433>
- [19] A. LEPCHAK, S.B. VOESE, S. B. "Evaluation of the efficiency of logistics activities using Data Envelopment Analysis (DEA)". *Gestão & Produção*, vol. 27, no. 1, p. e3371, 2020. <https://doi.org/10.1590/0104-530X3371-20>
- [20] P.F. LEE, W.S. LAM, W.H. LAM. "Performance Evaluation of the Efficiency of Logistics Companies with Data Envelopment Analysis Model". *Mathematics*, vol. 11, 2023.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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

Efecto sobre rendimiento cosechado de diferentes forrajes y labor de corte: estudio de caso en Oreamuno, Cartago

Effect on harvested yield of different forages and cutting work: case study in Oreamuno, Cartago

Javier Paniagua-Molina¹, Wilson Muñoz-Valerio², Johanna Solórzano-Thompson³

Fecha de recepción: 15 de julio, 2025
Fecha de aprobación: 29 de octubre, 2025

Paniagua-Molina, J; Muñoz-Valerio, W; Solórzano-Thompson, J. Efecto sobre rendimiento cosechado de diferentes forrajes y labor de corte: estudio de caso en Oreamuno, Cartago. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 85-100.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8056>

- 1 Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 javier.paniagua@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2815-5437>
- 2 Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 wilson.munoz@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8627-3883>
- 3 Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 johanna.solorzano@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0276-6849>



Palabras clave

Productividad forrajera; tecnologías de cosecha; prácticas agronómicas; modelación estadística; modelos lineales con efectos fijos.

Resumen

La elección y el manejo de forrajes es fundamental para optimizar la productividad de los sistemas agropecuarios. Por esta razón, se analiza el efecto del tipo de especie forrajera y el método de corte sobre el rendimiento de pasto cosechado en cinco fincas del cantón de Oreamuno, Cartago, Costa Rica. Para esto, se utilizó un diseño experimental y un modelo lineal con efectos fijos con el cual se estimó el impacto de variables agronómicas como forraje y operativas como mano de obra o maquinaria. Los resultados revelan diferencias significativas en el rendimiento según la especie utilizada y el tipo de labor, así como las interacciones entre ambos factores. Estos hallazgos ofrecen evidencia útil para la toma de decisiones orientadas a mejorar la eficiencia productiva de los sistemas forrajeros en zonas de altura tropical.

Keywords

Forage productivity; harvesting technologies; agronomic practices; statistical modeling; fixed-effects linear models.

Abstract

The selection and management of forages are essential for optimizing the productivity of agricultural systems. For this reason, the aim of this study is to analyze the effect of forage species and cutting method on the harvested pasture yield across five farms in the city of Oreamuno, Cartago, Costa Rica. An experimental design and a fixed-effects linear model were used to estimate the impact of agronomic variables, such as forage type, and operational variables like manpower or machine labor. The results reveal significant differences in yield depending on the species used and the type of cutting method, as well as interactions between both factors. These findings provide useful evidence for decision-making aimed at improving the productive efficiency of forage systems in tropical highland regions.

Introducción

La producción de forrajes constituye un pilar fundamental en los sistemas agropecuarios, especialmente en la ganadería, al proporcionar la base alimenticia para los animales rumiantes. En el contexto global, la optimización en la producción y cosecha de pasto se ve afectada por desafíos como el cambio climático y la eficiencia en el uso de recursos productivos que aporten beneficios a la seguridad alimentaria de las personas. Asimismo, la demanda mundial de productos pecuarios continúa en aumento, lo que implica una mayor presión en la siembra y cosecha de forrajes con el fin de garantizar la sostenibilidad y competitividad del sector [1].

El cambio climático modifica los patrones de precipitación y temperatura, lo cual tiene un efecto negativo directo en la disponibilidad de agua, la calidad productiva del suelo y la producción de materias primas como el pasto [2], [3]. En Costa Rica, la ganadería depende en gran medida de esta materia prima, ya sea como materia fresca o por medio de ensilaje como método de conservación [4]. En este sentido, la alimentación a base de forrajes es fundamental para la producción de carne, leche y sus derivados y su correcto uso permite mejorar la eficiencia productiva y reducir los costos en la cadena de producción pecuaria [5], [6].

En este contexto, la aplicación de modelos estadísticos como los Modelos Lineales de Efectos Fijos o Mixtos son útiles para analizar estos fenómenos. Estas metodologías han sido ampliamente utilizadas en campos de la investigación médica y epidemiológica [7], [8], ciencias sociales y ecología [9] [10] y econometría con el uso de datos de panel [11], [12].

De igual forma, estos métodos aplicados en ensayos agrícolas juegan un papel clave en la identificación de estrategias que potencien la producción forrajera, ya que permiten analizar el impacto de factores en el rendimiento, integrando variables controlables y efectos ambientales [13]. De igual forma, en otras investigaciones se ha utilizado la modelación lineal clásica y la incorporación de efectos aleatorios para estudiar la producción promedio de leche en vacas de la raza Lucerna y sus cruces [14]. Mientras que, en Costa Rica, se ha estudiado el potencial del maíz como insumo forrajero en la producción animal, donde la optimización de variables como materia seca, cantidad de azúcar soluble y almidones es máxima cuando el tiempo de cosecha y el tipo de especie son específicos [15].

La productividad forrajera depende de factores genéticos, condiciones edafoclimáticas y prácticas agronómicas. En este caso, al comparar híbridos de maíz con semillas autofecundadas y concluir que estos primeros presentan mayores rendimientos de grano y forraje [16]. En avena forrajera se demostró que la zona agroecológica y la condición de siembra influyen significativamente sobre la altura de la planta y el rendimiento, destacando la importancia del entorno en la adaptación vertical [17]. Esta interacción entre genética y ambiente también se evidencia en especies como cebada, donde tratamientos como soluciones nutritivas y sistemas productivos afecta la biomasa acumulada [18].

Por otra parte, el manejo agronómico como la densidad de siembra y la frecuencia de corte representan un efecto relevante en la productividad. La literatura ha encontrado que la interacción entre estas variables incrementa la biomasa, el contenido de clorofila y la proteína cruda en el pasto Cuba OM-22, lo cual demuestra la necesidad de un enfoque multivariable [19]. De igual manera, se ha descubierto que la frecuencia de corte a 60 días optimiza el rendimiento de materia seca en *Moringa oleifera* [20]. En esta línea, una serie de investigaciones ha comprobado que la fertilización nitrogenada, la edad de rebrote y la elección de especies como King Grass, Brachiarias y Ramio influyen significativamente tanto en la calidad nutricional como en la producción de forraje [21], [22], [23], [24].

Asimismo, el momento de la cosecha también representa un factor decisivo en el rendimiento y calidad del producto. Un estudio llevado a cabo en la India observó que, en cúrcuma, la fecha de recolección más el método de plantación, determina el rendimiento y la concentración de compuestos activos, alcanzando mejores resultados cuando la cosecha se posterga hasta Marzo [25]. En Bolivia, se coincidió con esta lógica en cultivos andinos, donde el rendimiento y el índice de cosecha variaron según la fase fenológica del cultivo, destacando el cultivar Kullaca como el más eficiente en conversión de biomasa a grano útil [26].

Finalmente, el tipo de tecnología empleada para cosechar puede modificar los resultados productivos. En Costa Rica, se demostró que, en caña de azúcar, la mecanización incrementa la eficiencia operativa, pero también eleva la proporción de materia extraña, lo cual reduce la pureza y el rendimiento de azúcar [27]. Mientras que en Brasil se encontró que en el cultivo de café la mecanización puede incrementar hasta ocho veces el rendimiento en comparación con métodos manuales, aunque requiere un balance entre la velocidad y la calidad de corte del producto [28]. Estos resultados son extrapolables a sistemas forrajeros, especialmente en contextos con limitación en la mano de obra.

En Oreamuno, Cartago, la producción de forrajes constituye un pilar económico fundamental, dado que es el principal insumo para la ganadería lechera. Si bien existen estudios previos sobre la optimización de recursos en la agricultura local, tales como la aplicación de programación

lineal para maximizar el rendimiento en cultivos de papa, cebolla y zanahoria [29] o la estimación de fertilizantes para minimizar costos [30], la literatura carece de investigaciones que aborden el rendimiento de forrajes por medio de modelos lineales con efectos fijos.

Por esta razón, el objetivo de esta investigación es analizar el efecto de distintas variedades de forrajes y labores de corte en el rendimiento de pasto cosechado, mediante la aplicación de modelos lineales con efectos fijos.

Materiales y métodos

Para estimar el rendimiento óptimo de forraje cosechado, la investigación implementó un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo [31]. De manera que, se llevó a cabo un diseño experimental analizando tres factores fijos: el tipo de especie forrajera utilizada para la alimentación animal el uso de mano de obra capacitada en la labor de corte y el uso de maquinaria para el corte de forraje (desbrozadora).

La recolección de datos se llevó a cabo durante los meses de mayo a agosto del 2024 para un total de 160 observaciones. La localización del experimento estuvo distribuida en cinco fincas ubicadas en un radio no mayor a 100 metros en el cantón de Oreamuno, Provincia de Cartago (figura 1).



Figura 1. Área de referencia para el estudio de rendimiento en forrajes, Oreamuno, Cartago. 2025. Fuente: [32].

El estudio recolectó datos de corte con mano de obra e implementación de machete para cada finquero en diferentes días y condiciones de tiempo. El servicio de desbrozadora lo realizó una sola persona con alto grado de especialización en el trabajo para todos los casos. Los forrajes comunes en las cinco fincas se encontraron sembrados principalmente en hileras a los bordes de los potreros, así como en potreros abiertos.

El proceso de recopilación de datos incluyó variables clave como: tiempo de corte (en horas), cantidad de cosecha (en kilogramos), rendimiento (kg/hora), tipo de corte (manual o uso de desbrozadora) y el tipo de forraje cosechado (Estrella africana, Ramio, King Grass y Botón de oro).

Además, se investigó el efecto de las interacciones entre las variables, generando cinco combinaciones específicas: Ramio-Desbrozadora, Ramio-Trabajador, Botón de Oro-Desbrozadora, Botón de Oro-Trabajador y Desbrozadora-Trabajador. Asimismo, es importante señalar que los efectos del forraje Estrella africana se incluyeron en el intercepto del modelo; por lo que, no se evaluó como efecto fijo individual ni interactivo. El cuadro 1 proporciona una descripción detallada de todas las variables consideradas.

Cuadro 1. Descripción de las variables utilizadas en el modelo lineal con efectos fijos. 2025

Código	Variable	Tipo	Descripción
FY	Rendimiento de pasto cosechado	CN	Rendimiento del forraje en kilogramos por hora (kg/h)
RM	Ramio	CL-B	Especie forrajera, donde: 1 = Ramio; 0 = Otra especie
KG	King Grass	CL-B	Especie forrajera, donde: 1 = King Grass; 0 = Otra especie
WSF	Botón de oro	CL-B	Especie forrajera, donde: 1 = Botón de oro; 0 = Otra especie
ASG	Estrella africana	CL-B	Especie forrajera, donde: 1 = Estrella africana; 0 = Otra especie
BC	Desbrozadora	CL-B	Labor mecánica, donde: 1 = Desbrozadora; 0 = Corte manual
WK	Trabajador	CL-B	Labor manual con dos trabajadores experimentados, donde: 1 = Trabajador; 0 = Corte mecánico
KGxBC	King Grass x Desbrozadora	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de King Grass y corte mecánico
KGxWK	King Grass x Trabajador	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de King Grass y corte manual
RMxBC	Ramio x Desbrozadora	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de Ramio y corte mecánico
RMxWK	Ramio x Trabajador	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de Ramio y corte manual
WSFxBC	Botón de oro x Desbrozadora	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de Botón de oro y corte mecánico
WSFxWK	Botón de oro x Trabajador	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de Botón de oro y corte manual
BCxWK	Desbrozadora x Trabajador	CL-B	Efecto interactivo entre el uso de dos tipos de corte: manual y mecánico

Note: CN = Cuantitativa; CL-B = Cualitativa binaria

En este sentido, es relevante enfatizar que si bien el estudio se definió metodológicamente como un diseño experimental, existen elementos que en la realidad de la persona productora se salen de un control técnico estricto en espacios controlados como ocurre en otros escenarios.

De manera que, el estudio no radicó en ser precisos con variables como el crecimiento de la planta, aplicaciones de fertilización, edad del rebrote u otros, sino de tener cierta flexibilidad que reflejara en mayor medida la realidad del agricultor.

Asimismo, la zona de vida del estudio correspondió a un Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB) con una altitud entre 1600-1700 m.s.n.m, donde las condiciones en cuanto al manejo técnico de un cultivo se vuelve relativamente estándar y los efectos climáticos se mantienen estables. A su vez, existen otras regiones colindantes descritas en la figura 2 que pertenecen a un Bosque Húmedo Premontano (bh-P), donde las condiciones de producción cambian y, por ende, sale del alcance de este estudio. Por lo tanto, estos elementos no se contemplaron y sí el demostrar la presencia de tecnologías de cosecha que existen en el lugar y que las personas agricultores aplican para mejorar sus rendimientos en pasturas.

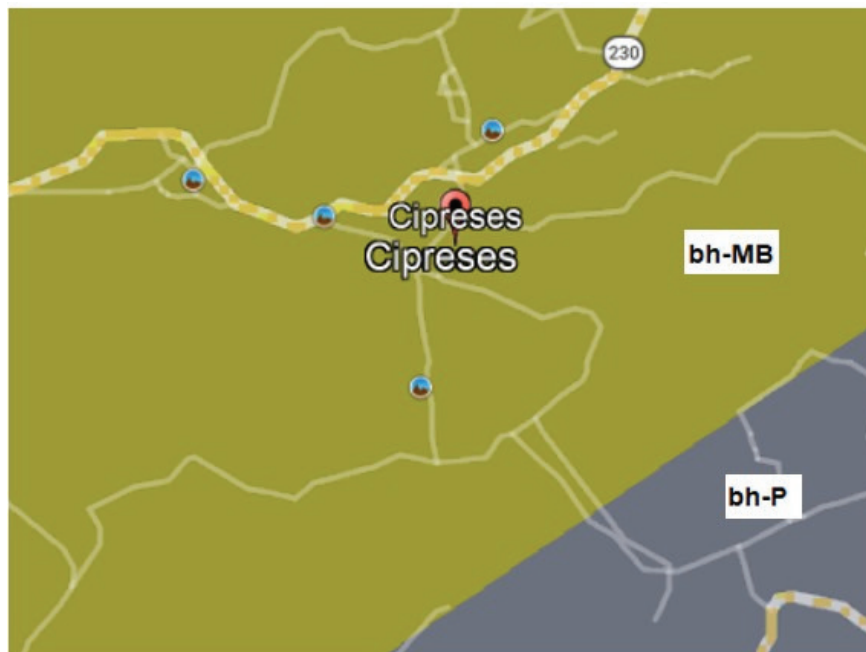


Figura 2. Zonas de vida presentes en el área de estudio, Oreamuno, Cartago. 2025. Fuente: [32].

Por su parte, los modelos lineales con efectos fijos (MLEF) derivan del modelo lineal clásico, usado en ensayos agrícolas y forestales para analizar la variabilidad basada en variables explicativas constantes [33]. En cambio, los modelos lineales mixtos (MLM) consideran efectos fijos y aleatorios, vinculados a factores controlables y externos, respectivamente [34]. Estos son útiles en diseños con bloques, parcelas o mediciones repetidas, donde la heterogeneidad es marcada [35]. La especificación de un modelo lineal con efectos fijos se expresa como (ecuación 1):

$$y_i = \mu + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Donde: y_i variable respuesta de la observación i ; μ la media general; β_j los coeficientes de efectos fijos asociados a la variable explicativa; X_{ij} valores predictivos de la observación i y ε_i el término de error aleatorio.

En un ensayo agrícola con la aplicación de unidades experimentales (i) y tratamientos (j), las respuestas varían en función de la combinación de estos dos elementos. Los efectos fijos de una unidad experimental (UE) representan diferencias sistémicas entre sí mismas y los tratamientos capturan la influencia de cada factor en la variable respuesta. Asimismo, los valores de X muestran a qué unidad y tratamiento pertenece cada observación por medio de categorizaciones binarias. De manera que, una observación Y_1 obtenida en la unidad 1 bajo el tratamiento A estará dada por $UE = 1$; $A = 1$ y cualquiera distinto a estos será igual a 0 [33], [35].

En este caso, los efectos fijos del modelo lineal se representaron como aquellos factores o tratamientos de interés; es decir, las variables relacionadas a la especie de forraje (RM, KG, WSF y ASG), labor de corte (BC y WK) y sus interacciones que determinan el rendimiento de pasto cosechado. De manera que, la especificación para el modelo se representa estadísticamente de la siguiente forma (ecuación 2):

$$FY_{ij} = \mu + \beta_1 BC + \beta_2 WK + \beta_3 RM + \beta_4 KG + \beta_5 WSF + \beta_6 RMBC + \beta_7 RMWK + \beta_8 WSFBC + \beta_9 WSFWK + \beta_{10} BCWK + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Donde: FY es el vector de observaciones; μ la media general; β_i el vector de parámetros de efectos fijos; BC, WK, RM, KG, WSF, RMxBC, RMxWK, WSFxBC, WSFxWK y BCxWK las regresoras que conforman la matriz de diseño de efectos fijos y ε el vector residual del modelo.

La estimación de β se obtuvo aplicando Mínimos Cuadrados Ordinarios (OLS) que permite obtener estimadores insesgados y eficientes; además, de seguir los supuestos básicos de regresión lineal: $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I)$ [36]. De igual manera, la estabilidad de los residuos se analizó mediante test de χ^2 para normalidad en la distribución de residuos, *White² only*, *Breusch-Pagan* y *Koenker* para contrastar la homocedasticidad en la varianza y *Breusch-Godfrey* de orden 1 para determinar cualquier presencia de correlación espacial entre residuos. Asimismo, se requirió de la medida correctiva denominada Mínimos Cuadrados Ponderados Factibles (WLSF) para la corrección de heterocedasticidad (ecuación 3):

$$\frac{\hat{Y}}{w_i} = \frac{\beta_0}{w_i} + \frac{\beta_1 X_1}{w_i} + \frac{\beta_2 X_2}{w_i} + \dots + \frac{\beta_k X_j}{w_i} + \frac{\mu_i}{w_i} \quad (3)$$

Finalmente, para estimar el modelo con mayor criterio de ajuste se aplicaron indicadores de pronóstico como Akaike, Bayesiano y Hannan Quinn; además, de indicadores de sesgo como MAPE y *Theil's U*.

Resultados y discusión

Resumen de estadística descriptiva

El cuadro 2 muestra el resumen estadístico de las variables utilizadas para el modelo. En este caso, la serie de datos establece un rendimiento promedio de pasto cosechado de 48,30 kg; además, el mínimo cosechado durante la fase experimental fue de 18 kg y el máximo alrededor de 90 kg de pasto. Asimismo, esta variable muestra otras características descriptivas como: asimetría positiva, distribución platicúrtica y una variabilidad de los datos alta (CV = 0,37).

Cuadro 2. Estadística descriptiva del rendimiento de forraje cosechado. 2025.

Variable	Media	Mediana	Min	Max	Desv. Est	CV	Asimetría	Curtosis
FY	48,30	45,50	18,00	90,00	17,92	0,37	0,33	-0,84

Nota: estadística basada en la muestra de observaciones final

Las regresoras seleccionadas para el modelo son de naturaleza binaria; es decir, solo pueden tomar valores de 0 o 1. Por lo tanto, la descripción se basa en la participación relativa que posee la variable en la muestra de observaciones al momento de dicotomizar (cuadro 3). De esta manera, las variables relacionadas a la labor de corte presentan una relación 50/50 al momento de recolectar los datos, mientras que las variables que corresponde al tipo de forraje cosechado presentan una mayor proporción de estar presente a la hora de la recolección en comparación al no estarlo; todos oscilan en una participación mayor al 75% (DMV = 1).

Cuadro 3. Participación relativa de las regresoras binarias para el modelo lineal de efectos fijos. 2025.

Variable	DMV = 1	DMV = 0
BC	50,00%	50,00%
WK	50,00%	50,00%
DRM	75,00%	25,00%
DWSF	75,00%	25,00%
DASG	74,36%	25,64%
DKG	75,64%	24,36%

Nota: DMV = Variable dicotomizada

Selección del modelo lineal de efectos fijos

Primeramente, se probaron diferentes combinaciones lineales y de transformación logarítmica (regresora dependiente) con los efectos binarios y labor de corte. Posteriormente, se incluyeron los efectos interactivos entre los factores y como resultado el cuadro 4 muestra el primer modelo de regresión lineal con arreglo log-lineal.

El modelo inicial presenta estabilidad en los coeficientes de regresión y significancia estadística con excepción de las interacciones KGxBC y KGxWK. Por otra parte, la bondad de ajuste es alta y la calidad de los criterios de predicción es aceptable. No obstante, el análisis de los residuos en la ecuación muestra la presencia de heterocedasticidad (cuadro 6, pruebas en residuos) para lo cual se procedió a aplicar Mínimos Cuadrados Ponderados Factibles como medida correctiva a la varianza de las observaciones.

Cuadro 4. Modelo lineal de efectos fijos inicial para el rendimiento de forraje, Oreamuno, Cartago. 2025.

Modelo lineal (ln_FY variable dependiente)					
Regresoras	Coficiente	Error estándar	Estadístico-t	Probabilidad	
Intercepto	3,0957	0,0311	99,57	<0,0001	***
BC	0,5261	0,0386	13,64	<0,0001	***
WK	0,5779	0,0386	14,99	<0,0001	***
DRM	0,2856	0,0422	6,762	<0,0001	***
DKG	0,2241	0,0422	5,304	<0,0001	***
DWSF	0,2364	0,0430	5,497	<0,0001	***
KGxBC	0,0740	0,0488	1,515	0,1318	-
KGxWK	-0,0073	0,0488	-0,1493	0,8815	-
RMxBC	0,3807	0,0488	7,805	<0,0001	***
RMxWK	-0,2852	0,0488	-5,848	<0,0001	***
WSFxBC	0,2432	0,0488	4,986	<0,0001	***
WSF xWK	-0,1478	0,0488	-3,029	0,0029	***
BCxWK	-0,2426	0,0345	-7,029	<0,0001	***
Criterios de decisión					
R ² ajustado	0,9226				
CAK	-242,55				
CSW	-202,57				
CHQ	-226,32				
MAPE	2,2862				
Theil's U	0,0423				

El análisis de los residuos sigue presentando niveles de heterocedasticidad alta, a pesar de haber aplicado la medida correctiva. Por lo tanto, se implementó un análisis gráfico de la dispersión de los residuos, complementado con el cálculo de los intervalos de confianza al 95% con en el cual se observa la presencia de valores atípicos a la línea promedio de los resultados (figura 3).

El análisis de los residuos continúa con una heterocedasticidad alta, a pesar de haber aplicado la medida correctiva. Por lo tanto, se implementó un análisis gráfico de la dispersión de los residuos, complementado con la estimación de un intervalo de confianza de [-3.25, 3.21] al 95% de aceptación.

Según la literatura y los resultados obtenidos, se indica que los residuos estandarizados con valores absolutos a 3 suelen considerarse indicativos de potenciales observaciones atípicas y valores superiores a 4 representan casos extremos con potencial influencia desproporcionada sobre los estimadores [37] [38]. Si se contempla el no castigar el modelo con el descarte de gran cantidad de observaciones y se incrementa el intervalo límite a [-4, 4], entonces se observa que existen al menos cuatro datos con característica de “outlier”.

En este sentido, dado que únicamente el 2,5% de las observaciones (4 de 160 iniciales) presentan residuos extremo, mientras que el 97,5% de las observaciones restantes se mantienen en un patrón homogéneo de dispersión y, considerando su desviación sustancial respecto a la muestra se procedió a eliminarlos, reduciendo la muestra a un total de 156 datos.

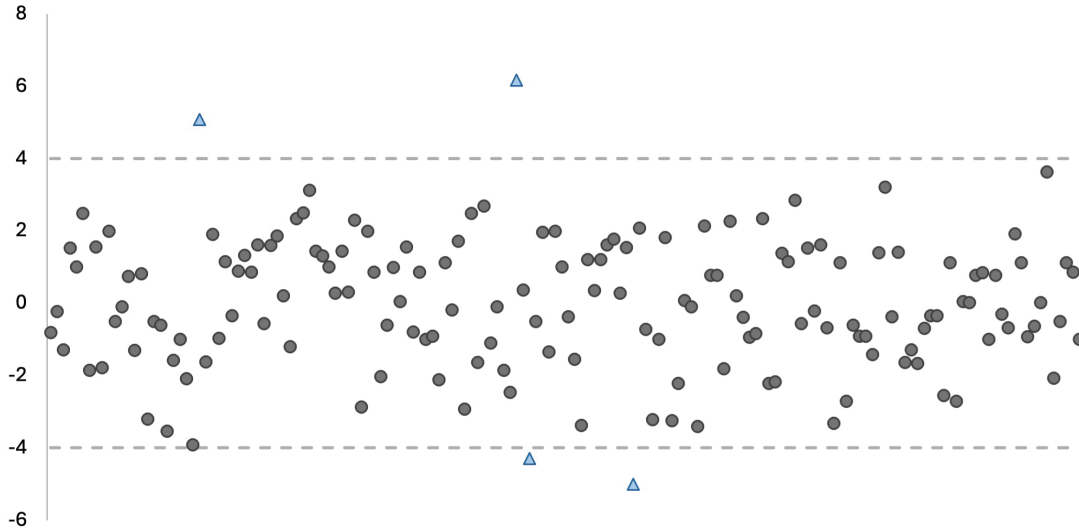


Figura 3. Gráfico de dispersión de residuos, modelo lineal de efectos fijos. 2025.

Con la base de datos corregida se computó un modelo final, eliminando las interacciones de las variables KGxBC y KGxWK que no presentaron significancia al inicio. Como resultado se obtiene diferencias estadísticamente significativas a cero ($\alpha = 1\%$) para los parámetros de la ecuación. De igual manera, la bondad de ajuste centrada es del 99,77% y los criterios de aceptación y sesgo son bajos. En consecuencia, el cuadro 5 define el modelo lineal de efectos fijos insesgado acorde a los datos del diseño experimental.

Cuadro 5. Modelo lineal de efectos fijos del rendimiento de forraje con WLSF en Oreamuno, Cartago. 2025.

Modelo lineal (ln_FY variable dependiente, arreglo WLSF)					
Regresoras	Coefficiente	Error estándar	Estadístico-t	Probabilidad	
Intercepto	3,0775	0,0310	99,1600	<0,0001	***
BC	0,5600	0,0316	17,7100	<0,0001	***
WK	0,5831	0,0311	18,7200	<0,0001	***
RM	0,3065	0,0415	7,3790	<0,0001	***
KG	0,2747	0,0227	12,0800	<0,0001	***
WSF	0,2401	0,0387	6,1980	<0,0001	***
RMxBC	0,3319	0,0430	7,7210	<0,0001	***
RMxWK	-0,2597	0,0436	-5,954	<0,0001	***
WSFxBC	0,2233	0,0317	7,0400	<0,0001	***
WSFxWK	-0,1553	0,0357	-4,355	<0,0001	***
BCxWK	-0,2629	0,0320	-8,210	<0,0001	***
Criterios de decisión					
R ² centrado	0,9977				
CAK	621,89				
CSW	655,44				
CHQ	635,51				
MAPE	2,1893				
Theil's U	0,0403				

Nota: Arreglo con Mínimos Cuadrados Ponderados Factibles (WLSF) y sin datos atípicos.

Por otra parte, el cuadro 6 muestra el comparativo de pruebas en los residuos. Según los test utilizados, el modelo lineal inicial presenta normalidad, pero no sigue el supuesto de varianza constante al considerar test como *White² only*, *Breush-Pagan* y *Konker* con criterios de rechazo de hipótesis nula menores a un $\alpha = 5\%$ de significancia.

Luego de aplicar las medidas correctivas y de eliminar observaciones atípicas, las pruebas en los residuos para normalidad, heterocedasticidad y autocorrelación presentan resultados favorables que no rechazan desde el punto de vista analítico irregularidades en el error del modelo. Esto, a su vez, respalda los resultados obtenidos en el modelo final (cuadro 5) así como los indicadores de su veracidad estadística.

De esta forma, el MLEF con arreglo WLSF y sin datos atípicos presenta las condiciones óptimas de los supuestos del análisis de regresión: varianza constante ($p > 25\%$), independencia de los residuos ($p > 65\%$) y normalidad ($p > 10-15\%$)

Cuadro 6. Test en residuos para el modelo lineal de efectos fijos. 2025.

Modelo	Test	Hipótesis nula	st	prob	Condición
Lineal inicial	Doornik-Hansen	Normalidad presente	2,6670	0,2635	No rechaza
	Jarque-Bera	Normalidad presente	2,3438	0,3098	No rechaza
	White ² only	No hay heterocedasticidad	23,7271	0,0222	Rechaza
	Breush-Pagan	No hay heterocedasticidad	19,0895	0,0864	Rechaza
	Konker	No hay heterocedasticidad	23,7271	0,0222	Rechaza
	Breush-Godfrey (1°)	No hay autocorrelación	1,0915	0,2979	No rechaza
Lineal con WLSF	Doornik-Hansen	Normalidad presente	4,6018	0,1002	No rechaza
	Jarque-Bera	Normalidad presente	3,8244	0,1478	No rechaza
	White ² only	No hay heterocedasticidad	17,9358	0,2661	No rechaza
	Breush-Pagan	No hay heterocedasticidad	9,6192	0,5649	No rechaza
	Konker	No hay heterocedasticidad	13,5835	0,2569	No rechaza
	Breush-Godfrey (1°)	No hay autocorrelación	0,1976	0,6574	No rechaza

1/ Arreglo con WLSF y sin datos atípicos

Rendimiento de pasto cosechado en Oreamuno de Cartago

Según las condiciones establecidas por el modelo lineal de efectos fijos, los resultados de la regresión indican que la implementación de desbrozadora y la cosecha manual incrementan el rendimiento de forraje en un 56% y 58%, respectivamente. Esto se puede traducir en menores costos para el productor y mayor disponibilidad del insumo para alimentación animal [39]. Los

forrajes, al igual que otros cultivos, dependen de un adecuado método de cultivo, el cual en ocasiones es beneficiado por la mecanización, mientras que, en otras, el cultivo manual resulta más eficiente [40], [41].

Asimismo, el incluir la combinación de pasturas como Ramio, King Grass y Botón de oro incrementan el rendimiento en un 31%, 27% y 24%, respectivamente y se contempla que el efecto de cualquier otro tipo de forraje se incluye en la media del modelo. No obstante, los resultados pueden verse afectados eventualmente por otras variables como: el clima, las condiciones de humedad y la topografía de las fincas [42]

En esta línea, también se observan diferentes efectos al obtener combinaciones entre las variables descritas. Por ejemplo, el sembrar especies forrajeras y cosecharlas mediante actividades mecanizadas puede incrementar el rendimiento de cosecha hasta un 33% (RMxBC) y 24% (WSFxBC). Mientras que, la implementación de labores culturales manuales disminuye el rendimiento de pasto cosechado que se podría obtener. Este valor puede disminuir hasta un 26% (RMxWK) o 16% (WSFxWK); al igual que en Bangladesh, donde se calculó una eficiencia del 62,5% y 57,9% al evaluar las características funcionales de la cosechadora combinada con forraje completo BRRRI en condiciones reales de campos agrícolas durante las temporadas Boro 2022 y Aman 2022 [43]

Finalmente, los efectos fijos individuales de la aplicación de mano de obra implican cambios positivos en el valor del rendimiento de pasto cosechado. Sin embargo, la interacción entre ambos escenarios simultáneamente no significa una relación directa como tal; al contrario, la relación intra-factorial de estas variables reduce el rendimiento hasta un 26% (BCxWK).

Por otra parte, la ecuación final del modelo se expresa matemáticamente en la ecuación 4. No obstante, debido a su transformación logarítmica, se aplica función exponencial para presentar los parámetros del modelo en su forma real y también para pronosticar los datos del diseño experimental (ecuación 5).

$$\ln FY = 3,08 + 0,56BC + 0,58WK + 0,31RM + 0,27KG + 0,24WSF + 0,33RMxBC - 0,26RMxWK + 0,22WSFxBC - 0,16WSFxWK - 0,26BCxWK \quad (4)$$

$$FY = e^{3,08+0,56BC+0,58WK+0,31RM+0,27KG+0,24WSF+0,33RMxBC-0,26RMxWK+0,22WSFxBC-0,16WSFxWK-0,26BCxWK} \quad (5)$$

Una vez definida la ecuación real se probó el ajuste del modelo por medio de un pronóstico al determinar el conjunto de variables estimadas según las observaciones iniciales y los parámetros de regresión (figura 4). Como resultado se observa que el nivel de ajuste (99,77%) muestra una diferencia mínima entre las variables observadas (Y) y estimadas (Ŷ).

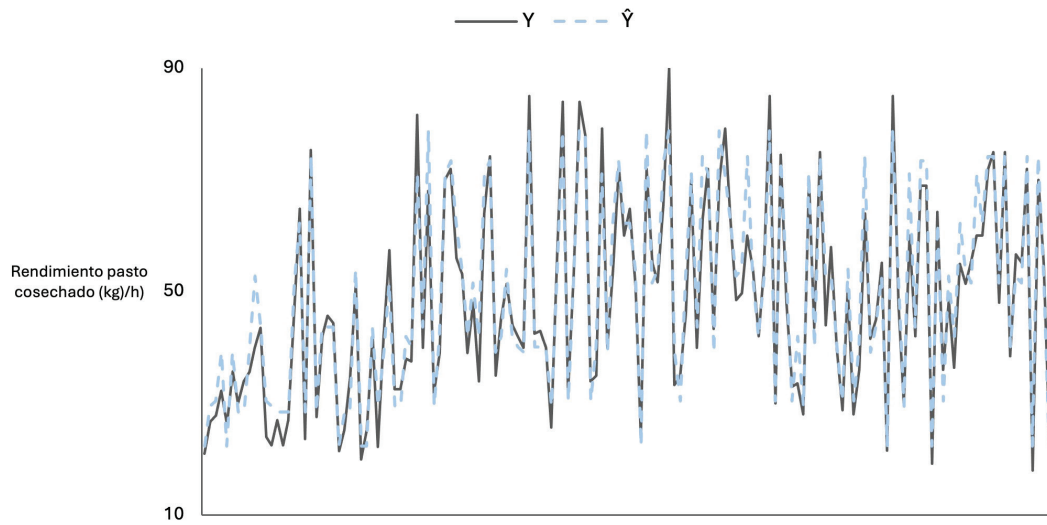


Figura 4. Pronóstico del rendimiento de forraje contrastado con las variables dependientes observadas.

El cuadro 7 muestra la simulación del rendimiento total de forraje cosechado en dos escenarios diferentes (A y B). El escenario B establece el valor máximo de rendimiento que se podría obtener si todos los parámetros que generan un cambio positivo se aplicaran y aquellos que generan un cambio negativo, no. El otro escenario (A) es el caso contrario y define el valor mínimo de rendimiento de pasto cosechado que se puede estimar con el modelo construido.

Cuadro 7. Rendimiento de pasto cosechado en dos escenarios, Oreamuno, Cartago, 2025.

Regresoras	Coefficientes	Escenario A	Escenario B
B0	3,0775	-	-
BC	0,5600	0	1
WK	0,5831	0	1
RM	0,3065	0	1
KG	0,2747	0	1
WSF	0,2401	0	1
RMxBC	0,3319	0	1
RMxWK	-0,2597	1	0
WSFxBC	0,2233	0	1
WSFxWK	-0,1553	1	0
BCxWK	-0,2629	1	0
In (FY)		2,40	5,60
FY (kg/h)		11,02	269,64
Tiempo (horas)		0,49	0,49
Total, FY (kg)		5,45	133,34

1/ Tiempo promedio de acuerdo con la muestra de observaciones

Conclusiones

El modelo para el rendimiento de forraje cosechado aplicado en fincas en Oreamuno de Cartago, Costa Rica demuestra que es afectado por diez atributos diferentes: tres tipos de forraje (Ramio, King Grass y Botón de oro) y dos métodos de cosecha (manual con trabajador experto y mecanizado con desbrozadora). Además de cinco efectos interactivos entre los factores de forraje y mano de obra, exceptuando las interacciones para el pasto King Grass.

No obstante, el rendimiento máximo alcanzable con las condiciones de este modelo lineal con efectos fijos es cuando la producción de pastos para producción animal se maneja con una combinación de forrajes Ramio, King Grass, Botón de oro y dos labores culturales de corta: Desbrozadora, Trabajador y los efectos de implementar estos pastos con labores mecanizadas. En consecuencia, asignar con categorías iguales a 1 a estas variables y 0 para aquellos cambios marginales negativos incrementa el rendimiento total en kilogramos hasta 24,46 veces.

A pesar de que la bondad de ajuste en el modelo es alta (99,77%), la literatura indica otros tipos de tratamientos como intervalos de corte, fertilización nitrogenada, abonos y enmiendas orgánicas como factores fijos para incrementar el rendimiento de materia seca y porcentaje de nutrientes en la planta. Por lo cual, es recomendable incorporar otras variables como frecuencia de corte, densidad de siembra o bien efectos económicos ligados al costo/beneficio de producción.

Costa Rica se caracteriza por el uso de forrajes como materia prima para la producción pecuaria, principalmente en ganadería de leche y carne. Por lo tanto, esta investigación funciona como línea base para ampliar los conocimientos sobre aplicación de nuevas tecnologías y métodos operativos como insumos para la eficiencia productiva de pasturas. Para esto, se recomienda implementar efectos aleatorios para un modelo lineal o no lineal mixto, modelos de fronteras estocásticas o modelos espaciales al involucrar el efecto de puntos georreferenciados

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo: financiación para acabar con el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todas sus formas”, FAO, 2024
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability: Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions”, IPCC, 2023
- [3] P.K. Thornton, J. Van de Steeg, A. Notenbaert y M. Herrero, “The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know”, *Agricultural Systems*, vol. 101, n° 3, pp. 113–127, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.05.002>
- [4] D. Monge & H. Ramírez, “Informe de gestión del sector agropecuario 2023-2024”, SEPSA-Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica, 2024. Accedido: 8 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sepsa.go.cr/documentos/informe-gestion-2023-2024.pdf>.
- [5] L. Álvarez, “Aporte de aminoácidos (AA) de forrajes de piso sobre los requerimientos de vacas lecheras en producción”, Tesis de grado, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://zootecnia.ucr.ac.cr/images/tesis/pdfs/alvarez-loaiciga-luis-felipe.pdf>
- [6] J. Osorio, V. Calderón, O. López y D. Restrepo, “Importancia de la disponibilidad de alternativas forrajeras para la alimentación de ganado bovino”, *Revista Politécnica*, vol. 20, n° 39, pp. 18-30, 2024, <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a2>
- [7] P. Schober y T. Vetter, “Linear Mixed-Effects Models in Medical Research”, *Anesthesia & Analgesia*, vol. 32, n° 6, pp. 1592-1593, 2020.
- [8] X. Wang, E. Andrinopoulou, K. Veen, J. Bogers y J. Takkenberg, “Statistical primer: an introduction to the application of linear mixed-effects models in cardiothoracic surgery outcomes research—a case study using homograft pulmonary valve replacement data”, *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, vol. 62, n° 4, ezac426, 2022, <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezac429>

- [9] X. Harrison, L. Donaldson, M.E. Correa Cano, J. Evans, D. Fisher, C. Goodwin, B. Robinson, D. Hodgson y R. Inger, "A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology", *PeerJ*, vol. 6, e4794, 2018, <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.4794>
- [10] L. Jost y P. Jansen, "Using linear mixed models to analyze learning processes within sessions improves detection of treatment effects: An exemplary study of chronometric mental rotation", *Methods in Psychology*, vol. 6, 100092, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.metip.2022.100092>
- [11] K. Imai y I.S. Kim, "On the Use to Two-Way Fixed Effects Regression Models for Causal Inference with Panel Data", *Political analysis*, vol. 29, n° 3, pp. 405-415, 2020, <https://doi.org/10.1017/pan.2020.33>
- [12] N. Loukas, "Temporal integration of the spatial autoregressive model for analyzing European multimodal freight transport demand", *Multimodal Transportation*, vol. 3, n° 3, 100149, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100149>
- [13] J. Salinas, O. Montesinos, G. Hernández y J. Crossa, "Generalized Linear Mixed Models with Applications in Agriculture and Biology, 1era Ed, Suiza: Springer, 2023
- [14] L. González y F. Hernández, "Aplicación de modelos lineales mixtos para estudiar la producción de leche en vacas de la raza Lucerna" *Revista de la Facultad de Ciencias*, vol. 9, n° 2, pp. 23-42, 2020, <http://dx.doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n2.84681>
- [15] M. Dittel, S. Brenes y W. Sánchez, "Potencial forrajero de variedades de maíces costarricenses", *Revista InterSedes*, vol. 23, n° 47, pp. 101-125
- [16] R. Gaytán Bautista, M.I. Martínez Gómez y N. Mayek Pérez, "Rendimiento de grano y forraje en híbridos de maíz y su generación avanzada", *Agricultura técnica en México*, vol. 35, n° 3, pp. 295-304
- [17] J.C. Zeballos Caban, W.L. Carrasco Chichlon y H.V. Vásquez Pérez, "Efecto de zonas agroecológicas y condición de siembre sobre altura de planta y rendimiento en avena forrajera en la región Puno, Perú", *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 36, n° 1, pp. 89-96, 2023, <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5992>
- [18] J.M. Salvador Castillo, M.A. Bolaños González, A.K. Cedillos Aviles, Y. Vázquez Chena y J.L. Meza Discua, "Efecto de aplicación de soluciones nutritivas en la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico Avena sativa y Hordeum vulgare", *Revista Terra Latinoamericana*, vol. 40, n° 996, pp. 1-16, 2022, <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.996>
- [19] J.C. Vargas Rojas y I. Carvajal Suárez, "Productividad del pasto Cuba OM-22 bajo diferentes densidades de siembra y frecuencia de cosecha", *Revista InterSedes*, vol. 24, n° 49, pp. 216-237, 2023.
- [20] J.L. Ledea Rodríguez, G. Rosell Alonso, D.G. Benítez Jiménez, R. Crucito Arias, V. Ramírez, Y. Nuviola Pérez y J.J. Reyes Pérez, "Rendimiento forrajero y sus componentes según la frecuencia de corte de Moringa oleífera, variedad Criolla", *Revista Agronomía Mesoamericana*, vol. 29, n° 2, pp.415-431, 2018.
- [21] M. Subandi, "The Effect of Fertilizers on the Growth and the Yield of Ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud)", *Asian Economic and Social Society*, vol. 2, n° 2, pp. 126-135, 2012.
- [22] J.M. Botero Londoño, E.M. Celis Celis y M.A. Botero Londoño, "Nutritional Quality, nutrient uptake and biomass production of *Pennisetum purpureum* cv. King Grass", *Scientific Reports*, vol. 11, n° 13799, pp. 1-8, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93301-w>
- [23] E.A. Polo, "Efectos de la fertilización orgánica sobre el rendimiento de materia seca de especies de *Brachiaria*", *Revista Semilla del Este*, vol. 1, n° 2, 2021.
- [24] L.M. Arias Gamboa, M. López Herrera, M. Castillo Umaña y A. Alpizar Naranjo, "Fertilización y edad de rebrote sobre rendimiento y composición bromatológica de *Tithonia diversifolia*", *Revista Agronomía Mesoamericana*, vol. 34, n° 3, 53172, 2023, <https://doi.org/10.15517/am.2023.53172>
- [25] B. Kumar y B.S. Gill, "Effect of method of planting and harvesting time on growth, yield and quality of turmeric (*Curcuma longa* L.)", *Journal of Spices and Aromatic Crops*, vol. 18, n° 1, pp. 22-27, 2009.
- [26] W.A. Macuchapi Córdova, R.J. Trigo Riveros, G.J. Chipana Mendoza y J.P. Rodríguez Calle, "Efecto de tres métodos de cosecha sobre el desgrane de seis cultivares de cañahua (*Chenopodium pallidicaule*) en el Altiplano Norte, Bolivia", *Revista de Investigación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, vol. 5, n° 2, pp. 90-100, 2018.
- [27] J. Bolaños Porras y M.E. Oviedo Alfaro, "Efecto de la cosecha mecanizada sobre los rendimientos industriales de la caña de azúcar (*Saccharum* spp) en el Ingenio Quebrada Azul, San Carlos, Costa Rica", Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, 2006. Accedido: 1 de junio de 2025 [En línea]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5873>

- [28] G.R. de Sousa Filho, H. Duarte Viera, W. Pereira Rodrigues y F. Luiz Partelli, "Comparison between manual and semi-mechanical harvest of coffee fruit in mountainous areas", *African Journal of Agricultural Research*, vol. 10, n° 28, pp. 2724-2730, 2015, <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9356>
- [29] D. Barboza, J. Solórzano, J. Paniagua, "Optimización económica para el cultivo de papa, zanahoria y cebolla en Cartago, Costa Rica", *Revista e-Agronegocios*, vol. 34, n° 4, pp. 38-49, 2021
- [30] J. Paniagua, "Modelo de programación lineal para minimizar el costo de fertilización granulada de macro nutrientes en el cultivo de la zanahoria en Costa Rica", *Revista e-Agronegocios*, vol. 1, n° 1, pp. 1-13, 2015.
- [31] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, "Metodología de la investigación", 6ta Ed, México: McGraw-Hill, 2014
- [32] Google Earth Pro, version 7.3.6, Google LLC, Mountain View, CA, USA, 2024. Accedido: 21 de mayo de 2025. [Software]. Disponible en: <https://www.google.com/earth/>
- [33] M. Balzarini, R. Macchiavelli y F. Casanoves, "Aplicaciones de Modelos mixtos en Agricultura y Forestería", 1era Ed: Universidad Nacional de Córdoba, Universidad de Puerto Rico, CATIE, 2004
- [34] J.C. Pinheiro y D.M. Bates, "Mixed-Effects Models in S and S-PLUS", 1era Ed, Estados Unidos: Springer, 2000
- [35] D.C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", 6ta Ed, Estados Unidos: John Wiley&Sons, 2005
- [36] D.N. Gujarati y D.C. Porter, "Econometría", 1era Ed, México: McGraw-Hill Interamericana, 2010
- [37] M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim. J. Neter y W. Li, "Applied linear statistical models", 5ta Ed, Estados Unidos: McGraw-Hill", 2005
- [38] W.H. Greene, "Econometric analysis", 8va Ed, Estados Unidos: Pearson Education, 2018
- [39] J. Pargi Sanjay, P. Pankaj Gupta y V. Bambhaniya, "Comparison between Manual Harvesting and Mechanical Harvesting", *Journal of Scientific Research and Reports*, vol. 30, n° 6, pp. 917-934, 2024, <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62110>
- [40] A. Marinho do Nascimento, F. Bezerra da Costa, J. Leite da Silva, M.E. Barbosa Brito, T. Marinho Gadelha, L.J. Gomes Grade, L. de Andrade Silva, A. Formiga dos Santos, K. Gomes da Silva, M. Santos da Silva y L. de Sousa Sátiro, "Post Harvest Quality of Bt Green Maize Produced in Different Water Harvesting Techniques with the Application of Rooting", *Journal of Experimental Agriculture International*, vol. 27, n° 1, pp. 1-13, 2018, <https://doi.org/10.9734/JEAI/2018/44250>
- [41] S.P. Patrick Vanbeveren, R. Spinelli, M. Eisenbies y J. Schweier, "Mechanised harvesting of short-rotation coppices", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 90-104, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.059>
- [42] K. Esau, Q.U. Zaman, A.A. Farooque, T.J. Esau, A.W. Schumann y F. Abbas, "Yield monitoring and mechanical harvesting of wild blueberries to improve farm profitability", en "Precision Agriculture. Evolution, insights and Emerging Trends", Q. Zaman, Ed. 1era Ed, Cambridge, Estados Unidos: Academic Press, 2023, pp. 123-140
- [43] A. Khan, A. Islam, M. Pintu, S. Paul, M. Huda, M. Hossen, M. Islam y M. Ahmmad, "Assessment of BRRI Whole Feed Combine Harvester (Model BRRI WCH2021) for Mechanized Rice Harvesting in Bangladesh", *Agricultural Sciences*, vol. 15, pp. 274-291, 2024, [10.4236/as.2024.152016](https://doi.org/10.4236/as.2024.152016).

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores declaramos que hemos utilizado una herramienta de inteligencia artificial *ChatGPT* para asistirnos en la redacción de este artículo. Esta herramienta nos ayudó a mejorar la estructura y la claridad en ciertas partes del texto. Los contenidos generados por la IA fueron con base a redacciones previas hechas por nosotros y, además, fueron revisadas minuciosamente para asegurar su precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Módulos dinámicos de *Pinus pseudostrobus* y de tableros de madera

Dynamic modules of *Pinus pseudostrobus* and wood panels



Javier Ramón Sotomayor-Castellanos¹

Fecha de recepción: 23 de julio, 2025
Fecha de aprobación: 2 de noviembre, 2025

Sotomayor-Castellanos, J.R. Módulos dinámicos de *Pinus pseudostrobus* y de tableros de madera. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 101-110.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8072>



¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
 javier.sotomayor@umich.mx
 <https://orcid.org/0000-0002-1527-8801>

Palabras clave

Tableros enlistonados; tableros contrachapados; tableros de densidad media; tableros de astillas orientadas; densidad de la madera; pruebas de ultrasonido.

Resumen

El estudio compara las propiedades físicas y dinámicas de la madera sólida de *Pinus pseudostrabus* y cuatro tipos de tableros derivados: enlistonados, contrachapados, de densidad media y de astillas orientadas. Se elaboraron cinco grupos de probetas para determinar contenido de humedad, densidad y módulos dinámicos en direcciones transversal y longitudinal mediante ultrasonido. Los contenidos de humedad fueron relativamente homogéneos, con menor variación en los tableros industrializados. En densidad, los tableros de densidad media y de astillas orientadas superaron a la madera sólida, mientras que los enlistonados mostraron menor densidad y mayor dispersión. Respecto a los módulos dinámicos, la madera sólida presentó el mayor valor longitudinal, y los contrachapados destacaron en rigidez transversal. La anisotropía dinámica fue más alta en la madera sólida, en contraste con los tableros derivados, sobresaliendo los de densidad media por su comportamiento casi isotrópico. Se concluye que, aunque la madera sólida mantiene ventajas en aplicaciones unidireccionales, los tableros contrachapados, de astillas orientadas y de densidad media combinan estabilidad dimensional, homogeneidad y competitividad mecánica, adecuados para sistemas bidireccionales y mobiliario. Se plantean líneas futuras para optimizar anisotropía y sostenibilidad.

Keywords

Edge-glued panels; plywood; medium-density fiberboard; oriented strand boards; wood density; ultrasound tests.

Abstract

This study compares the physical and dynamic properties of solid *Pinus pseudostrabus* wood and four types of engineered wood panels: edge-glued, plywood, medium-density fiberboard (MDF), and oriented strand board (OSB). Five groups of specimens were prepared to determine moisture content, density, and dynamic moduli in longitudinal and transverse directions using ultrasound. Moisture contents were relatively homogeneous, with lower variation in industrial panels. In terms of density, MDF and OSB exceeded solid wood, while edge-glued panels showed lower density and greater dispersion. Regarding dynamic moduli, solid wood exhibited the highest longitudinal value, while plywood stood out for its transverse stiffness. Dynamic anisotropy was highest in solid wood, in contrast to the derived panels, with MDF showing an almost isotropic behavior. It is concluded that while solid wood retains advantages in unidirectional applications, plywood, OSB, and MDF offer a combination of dimensional stability, homogeneity, and mechanical competitiveness suitable for bidirectional structural systems and precision furniture. Future lines of research are proposed to optimize anisotropy and the sustainability of these materials.

Introducción

Los tableros de madera se emplean extensamente en las industrias de la construcción, del mobiliario y de productos de valor añadido, donde desempeñan un papel crucial por su funcionalidad técnica y su valoración por parte del consumidor [1]. La madera aserrada de *Pinus pseudostrabus* es igualmente un material con una amplia gama de utilización en

ingeniería de la madera [2]. Los datos empíricos del módulo dinámico de *P. pseudostrobus* para madera sólida se reportan utilizando ultrasonido por [3], mientras que la caracterización mecánica de los tableros de madera se reporta en [4]. La magnitud del módulo dinámico varía según el tipo de tablero, la especie, la dirección de medida, así como la técnica empleada en su determinación [5].

Pese a la relevancia en el campo de la ingeniería del módulo dinámico de los tableros de madera, la información técnica que define este parámetro se encuentra dispersa en la literatura. Hay escasas investigaciones que examinan diversas categorías de tableros y comparan su módulo dinámico con el de una especie de uso extenso, como es la madera de *P. pseudostrobus*. El objetivo de la investigación fue determinar los módulos dinámicos, tanto transversales como longitudinales, de la madera sólida de *P. pseudostrobus* y de tableros de madera enlistonados, contrachapados, de densidad media y de astillas orientadas.

Materiales y métodos

Se adquirieron madera aserrada de *P. pseudostrobus* y tableros comerciales a base de madera. Se elaboraron cinco grupos de 32 probetas cada uno: madera de *P. pseudostrobus* (MS), tableros enlistonados (TE), contrachapados (TC), de densidad media (TDM) y de astillas orientadas (TAO). Sus dimensiones fueron 60 cm de largo por 15 cm de ancho y con espesores de 20 cm para el *P. pseudostrobus*, 18 cm para los TE, TC, TDM y de 16 cm para los TAO. Los tableros están constituidos con madera del género *Pinus* y consolidados con resina de urea-formaldehído. La Figura 1 muestra los esquemas de la estructura de los tableros [6].

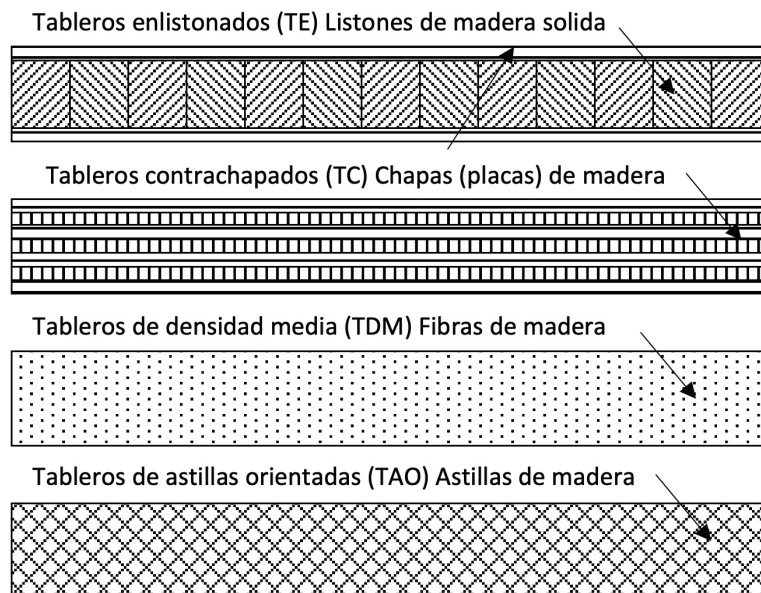


Figura 1. Esquemas de la estructura de los tableros Fuente: [6].

La determinación del contenido de humedad se basó en la diferencia de pesos observada durante el ensayo y tras su secado en horno a una temperatura de 103°C durante un período de 72 horas de acuerdo con la norma ISO 13061-1:2014 [7]. La densidad se calculó mediante la relación peso/volumen al momento del ensayo, conforme a la norma ISO 13061-2:2014 [8].

El módulo dinámico se determinó adaptando la metodología reportada por [9]. Las pruebas no destructivas se realizaron mediante la medición del tiempo de transmisión del ultrasonido utilizando el aparato Sylvatest®. Para ello, se colocaron el emisor y el receptor en los extremos

de las probetas (Figura 2). Se llevaron a cabo las mediciones en las direcciones transversal y longitudinal, con el emisor ajustado a una frecuencia de 22 kHz. Se determinó la velocidad del ultrasonido mediante el cociente de la distancia entre los sensores emisor y receptor y el tiempo registrado por el aparato. Se calculó el módulo dinámico utilizando la ecuación (1) [10]:

$$E_{us} = \rho_{CH} \times v_{us}^2 \quad (1)$$

Donde:

E_{us} = Módulo dinámico ($N\ m^{-2}$)

ρ_{CH} = Densidad ($kg\ m^{-3}$)

v_{us} = Velocidad del ultrasonido ($m\ s^{-1}$).



Figura 2. Prueba de ultrasonido en tableros contrachapados.

Resultados

Al analizar las medias de contenido de humedad de los distintos materiales, se observa una relativa homogeneidad, con valores que fluctúan entre 10 % y 12 %. La madera sólida de *P. pseudostrobus* y los tableros contrachapados presentan una media de 11 %, mientras que los tableros enlistonados registran el valor más alto (12 %) y los tableros de densidad media y de astillas orientadas el más bajo (10 %). Esta ligera variación es consistente con los procesos de fabricación y secado controlados que caracterizan a los productos derivados de madera.

En cuanto a la dispersión de estos valores, reflejada en el coeficiente de variación (CV), se identifican diferencias más notables. Los tableros de densidad media y los tableros enlistonados presentan los CV más bajos (4 %), lo que indica una mayor homogeneidad en su contenido de humedad. Por su parte, los tableros de astillas orientadas muestran el CV más alto (7 %), evidenciando una mayor variabilidad interna, posiblemente atribuible a la estructura heterogénea de sus partículas orientadas. Los valores de contenido de humedad de los tableros son deliberadamente controlados durante la fabricación, permitiendo propiedades más estables frente a la madera sólida, que depende de las condiciones ambientales [1].

Respecto a la densidad, se evidencia una variación considerable entre los diferentes materiales (Figura 3a). La madera sólida presenta una densidad media de $596\ kg\cdot m^{-3}$, mientras que los tableros enlistonados registran el valor más bajo ($319\ kg\cdot m^{-3}$), aproximadamente un 46 % inferior a la madera sólida. Este dato refleja la disposición discontinua de listones y las zonas de encolado, que reducen la compacidad del material, especialmente los tableros comerciales [6]. Por su parte, los tableros contrachapados alcanzan los $506\ kg\cdot m^{-3}$, situándose un 15 % por debajo de la madera sólida, aunque con una notable ventaja en cuanto a la homogeneidad

dimensional y estabilidad. Los tableros de densidad media y los tableros de astillas orientadas superan la densidad de la madera sólida, con $634 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $695 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente. Esta mayor densidad se explica por el elevado grado de compactación y la utilización de adhesivos termo endurecibles durante su manufactura, lo que incrementa la masa por unidad de volumen.

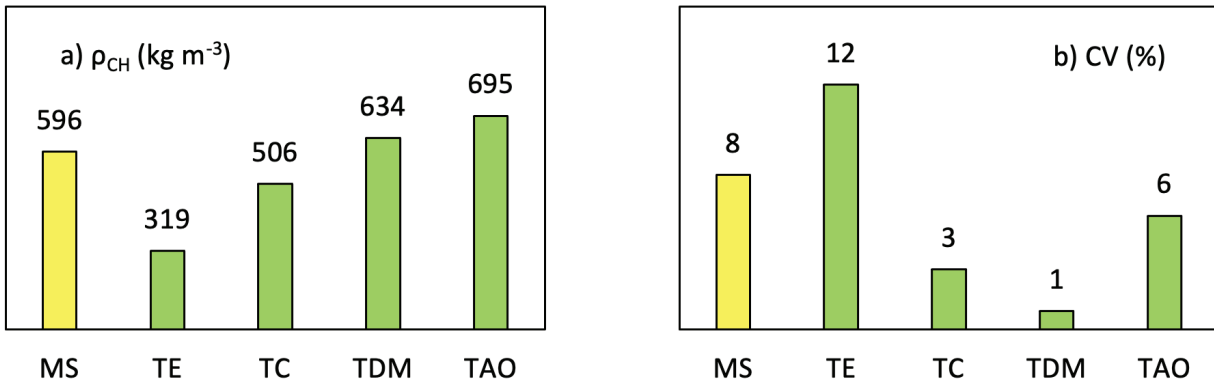


Figura 3. a) Densidades (ρ_{CH}), b) Coeficientes de variación (CV). MS = Madera sólida, TE = Tableros enlistonados, TC = Tableros contrachapados, TDM = Tableros de densidad media, TAO = Tableros de astillas orientadas.

En relación con los coeficientes de variación de la densidad (Figura 3b), los tableros de densidad media muestran el valor más bajo (1 %), revelando una excelente uniformidad, propiedad deseable para aplicaciones donde se requiere estabilidad estructural y precisión dimensional. Por el contrario, los tableros enlistonados presentan la mayor variabilidad (12 %), reflejando su carácter discontinuo y la influencia de la heterogeneidad propia de los listones de madera maciza. La baja densidad de los tableros enlistonados podría ser ventajosa en aplicaciones donde se prioriza la ligereza sobre la resistencia mecánica. La elevada homogeneidad de los tableros de densidad media respalda su uso en mobiliario de precisión y carpintería de interiores [11].

El análisis de los módulos dinámicos transversales (E_{usT}) revela diferencias significativas entre los materiales evaluados (Figura 4a). La madera sólida presenta el valor más bajo, con una media de $822 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$, mientras que los tableros contrachapados registran el E_{usT} más alto ($5694 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-2}$), superando ampliamente a los demás materiales. Este comportamiento se atribuye a la disposición cruzada de sus láminas, que mejora notablemente la rigidez transversal del material [12].

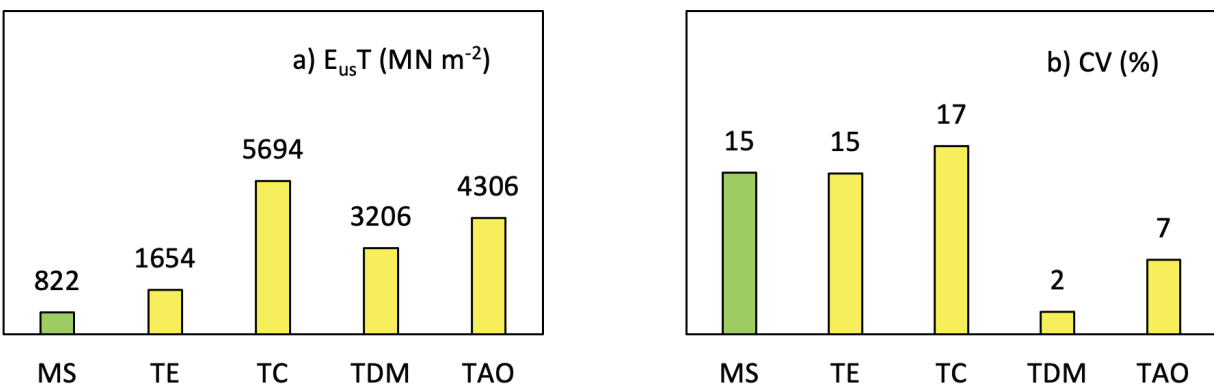


Figura 4. a) Módulos dinámicos transversales (E_{usT}), b) Coeficientes de variación (CV). MS = Madera sólida, TE = Tableros enlistonados, TC = Tableros contrachapados, TDM = Tableros de densidad media, TAO = Tableros de astillas orientadas.

Los tableros de astillas orientadas y los tableros de densidad media también presentan valores relativamente elevados, de 4306 y 3206 MN m⁻², respectivamente. En ambos casos, su estructura compuesta de partículas compactadas y adhesivos termo endurecibles favorece una respuesta mecánica más uniforme y rígida en sentido transversal, en comparación con la madera sólida [13]. Por su parte, los tableros enlistonados alcanzan un E_{us}T de 1654 MN m⁻², duplicando el valor de la madera sólida, aunque con mayor variabilidad estructural debido a la disposición discontinua de sus listones.

En cuanto a la dispersión de los valores, medida a través del coeficiente de variación, los tableros de densidad media destacan por su homogeneidad, con un CV de apenas 2 %, evidenciando un control de calidad superior en su fabricación (Figura 4b). En contraste, los tableros contrachapados exhiben el CV más alto (17 %), debido a la posible variabilidad entre las chapas empleadas y su orientación relativa.

En la dirección longitudinal, la madera sólida conserva su superioridad con un módulo dinámico longitudinal (E_{us}L) de 17960 MN m⁻², valor que supera ampliamente al resto de los materiales analizados (Figura 5a). Esta diferencia se explica por la continuidad y alineación natural de las traqueidas a lo largo del eje longitudinal, característica intrínseca de la madera maciza [14].

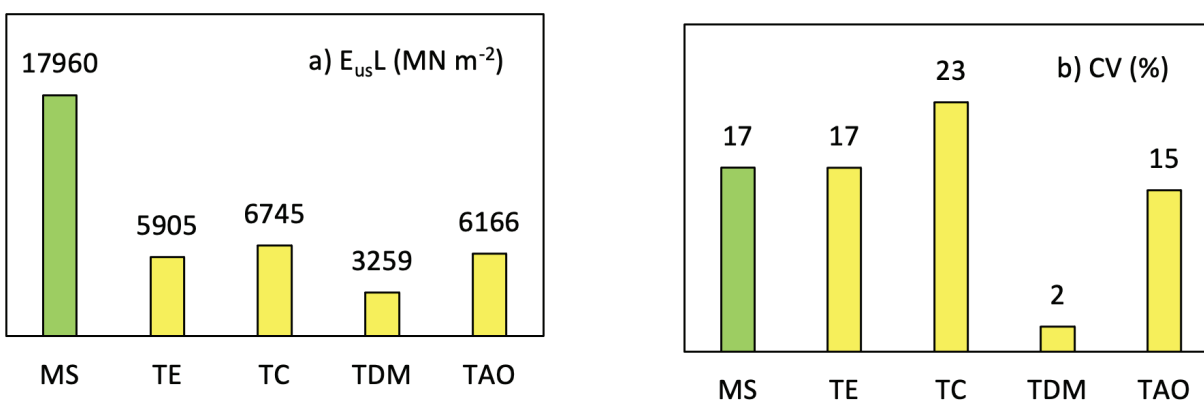


Figura 5. a) Módulos dinámicos longitudinales (E_{us}L), b) Coeficientes de variación (CV).
MS = Madera sólida, TE = Tableros enlistonados, TC = Tableros contrachapados, TDM = Tableros de densidad media, TAO = Tableros de astillas orientadas.

Entre los tableros, los contrachapados logran el segundo valor más alto (6745 MN m⁻²), gracias a su estructura laminar alternada, que aunque no iguala la rigidez de la madera sólida, sí ofrece un comportamiento mecánico aceptable y estable en ambas direcciones (Figura 5a). Los tableros de astillas orientadas y los tableros enlistonados presentan valores intermedios, de 6166 y 5905 MN m⁻², respectivamente, siendo este último inferior debido a la discontinuidad estructural de sus listones. Los tableros contrachapados y de astillas orientadas ofrecen un equilibrio entre rigidez y estabilidad dimensional, ideales para elementos estructurales sometidos a cargas bidireccionales.

Finalmente, los tableros de densidad media alcanzan el E_{us}L más bajo, con 3259 MN·m⁻², debido a la naturaleza particulada de su composición, que aunque homogénea, no permite transmitir eficientemente esfuerzos longitudinales elevados. No obstante, es destacable su excelente uniformidad (CV = 2) (Figura 5b), característica favorable para aplicaciones donde la estabilidad dimensional y la consistencia son prioritarias [15]. Estos tableros, pese a su menor rigidez, destacan por su homogeneidad, condición indispensable en mobiliario de precisión, puertas y recubrimientos interiores. Esta variabilidad puede ser contrastada por la dispersión de los valores entre la madera sólida y los tableros (Figura 6). Se observa que los agrupamientos

de los E_{usL} correspondientes a la madera sólida y a los diferentes tipos de tableros, coinciden con las magnitudes de sus coeficientes de variación. Por razones de escala en estas nubes no se visualizan los 32 datos correspondientes a cada grupo de probetas.

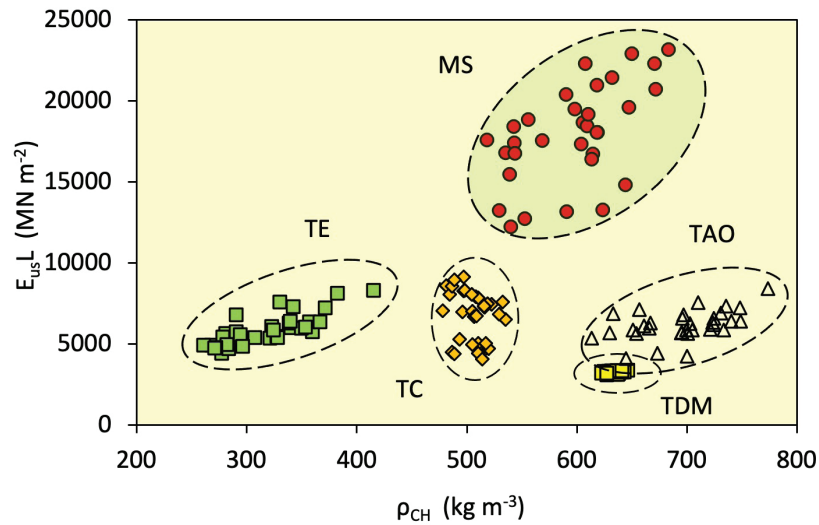


Figura 6. Dispersión de los módulos dinámicos longitudinales (E_{usL}) en función de las densidades (ρ_{CH}). MS = Madera sólida, TE = Tableros enlistonados, TC = Tableros contrachapados, TDM = Tableros de densidad media, TAO = Tableros de astillas orientadas.

El comportamiento anisotrópico de los materiales lignocelulósicos está condicionado por la dirección de sus fibras o partículas y por la disposición estructural de sus componentes. Al comparar los valores medios de los módulos dinámicos transversales y longitudinales, se aprecia una notable disparidad entre la madera sólida y los tableros derivados (Figura 7).

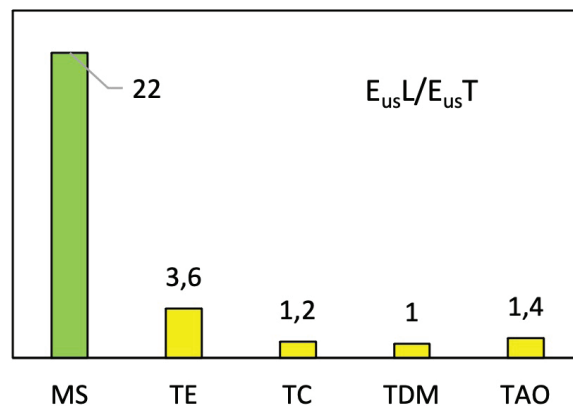


Figura 7. Anisotropías de los módulos dinámicos (E_{usL}/E_{usT}). MS = Madera sólida, TE = Tableros enlistonados, TC = Tableros contrachapados, TDM = Tableros de densidad media, TAO = Tableros de astillas orientadas.

La madera sólida exhibe una anisotropía dinámica elevada, con una relación E_{usL}/E_{usT} de 22, resultado de su estructura fibrosa alineada que ofrece gran rigidez en sentido longitudinal y limitada capacidad de carga en sentido transversal. Este comportamiento coincide con lo reportado por [16], quien describe que la madera sólida puede presentar relaciones superiores a 20 entre sus módulos dinámicos longitudinal y transversal debido a su anisotropía natural.

La anisotropía dinámica elevada de la madera sólida, aunque proporciona gran rigidez a lo largo de la fibra, puede ser desfavorable en aplicaciones donde se requieren propiedades balanceadas en distintas direcciones de carga.

En los tableros enlistonados, esta relación se reduce significativamente a 3,6, lo que refleja una menor anisotropía atribuida a la disposición alternada de los listones y a la presencia de adhesivos que mitigan las diferencias entre direcciones ortotrópicas. Este efecto de moderación de la anisotropía mediante técnicas de ensamblaje se ha documentado también en tableros laminados y tableros enlistonados.

Los tableros contrachapados y los tableros de astillas orientadas presentan relaciones E_{usL}/E_{usT} de 1,2 y 1,4, respectivamente. Estos valores evidencian un comportamiento cuasi isotrópico, especialmente en el caso de los contrachapados, donde la alternancia de capas en direcciones perpendiculares equilibra las propiedades dinámicas en ambas direcciones principales [17]. Por su parte, en los tableros de astillas orientadas, aunque las astillas están orientadas mayormente en sentido longitudinal, el efecto de la disposición multicapa y el uso de adhesivos reduce la anisotropía de forma significativa. Así, los tableros contrachapados y de astillas orientadas resultan ventajosos para sistemas estructurales de tipo bidimensional debido a su comportamiento más equilibrado.

Finalmente, los tableros de densidad media alcanzan una relación E_{usL}/E_{usT} de uno, lo que indica un comportamiento dinámico prácticamente isotrópico. Este resultado se explica por la distribución aleatoria de partículas finas en su estructura interna. Así, la homogeneidad de los tableros de densidad media proporciona propiedades elásticas muy similares en todas las direcciones. La isotropía casi perfecta de los tableros de densidad media los convierte en materiales ideales para aplicaciones en mobiliario y carpintería interior, donde la uniformidad de respuesta mecánica es prioritaria.

Conclusiones

El análisis comparativo revela que, aunque el contenido de humedad de los materiales estudiados presenta poca variabilidad en sus medias, las diferencias en la dispersión y en las densidades son significativas. Los tableros de densidad media y de astillas orientadas destacan por su alta densidad y baja variabilidad, lo que los convierte en materiales idóneos para aplicaciones estructurales y decorativas de alta estabilidad. En contraste, los tableros enlistonados, con su menor densidad y mayor variabilidad, se recomiendan para usos donde la ligereza es prioritaria.

Estos resultados coinciden con hallazgos recientes que subrayan la importancia del control de humedad y densidad en el desempeño físico-mecánico de tableros derivados. Futuras investigaciones podrían profundizar en el comportamiento higroscópico y las propiedades mecánicas bajo diferentes condiciones ambientales, así como en el desarrollo de adhesivos y tratamientos que optimicen la estabilidad dimensional de los tableros más heterogéneos.

Este análisis permite establecer que la madera sólida mantiene una superioridad significativa en cuanto al módulo dinámico longitudinal, lo que la posiciona como la opción ideal en aplicaciones donde se prioriza la resistencia a la flexión a lo largo de la fibra. No obstante, los tableros derivados, especialmente los contrachapados y los de astillas orientadas, presentan módulos dinámicos transversales y longitudinales competitivos, acompañados de una mayor estabilidad dimensional y homogeneidad estructural.

Futuras líneas de investigación podrían centrarse en optimizar la orientación y compactación de partículas en tableros de densidad media y astillas orientadas, así como en el desarrollo de adhesivos estructurales de bajo impacto ambiental que contribuyan a mejorar las propiedades dinámicas sin comprometer la sostenibilidad del producto.

Los resultados obtenidos permiten concluir que, entre los materiales evaluados, la madera sólida mantiene la anisotropía dinámica más alta, lo cual la hace apta para elementos sometidos a cargas predominantemente longitudinales. Por el contrario, los tableros contrachapados, de astillas orientadas y de densidad media presentan niveles de anisotropía notablemente menores, favoreciendo su aplicación en componentes que requieren estabilidad mecánica en múltiples direcciones.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Se agradece a los alumnos de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera (UMSNH) por su participación en los trabajos de laboratorio.

Referencias

- [1] A. N. Papadopoulos, "Advances in Wood Composites II", 1st ed. Basel: MDPI, 2020. <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-522-7>
- [2] A. Rendón, F. Dorantes, S. Mejía, and L. Alamilla, "Características macroscópicas, propiedades y usos de la madera de especies nativas y exóticas en México", 1a ed. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2021. [Online]. Available: <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/15522.pdf>
- [3] J. R. Sotomayor Castellanos and I. Macedo Alquicira, "Caracterización por ultrasonido del multimaterial madera-malla-adhesivo," *Prisma Tecnológico*, vol. 16, no. 1, pp. 24–30, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/3972>
- [4] P. Niemz, W. Sonderegger, T. Keplinger, J. Jiang, and J. Lu, "Physical Properties of Wood and Wood-Based Materials," in *Handbook of Wood Science and Technology*, P. Niemz, A. Teischinger, and D. Sandberg, Eds. Cham: Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_6
- [5] Z. Cai, C. A. Senalik, and R. J. Ross, "Mechanical properties of wood-based composite materials," in *Wood handbook. Wood as an engineering material*, Madison: Forest Products Laboratory, 2021. [Online]. Available: https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/fplgtr/fplgtr282/chapter_12_fpl_gtr282.pdf
- [6] J. R. Sotomayor Castellanos and I. Macedo Alquicira, "Determinación de las propiedades de higoexpansión de tableros compuestos a base de madera," *Rev. Cienc. Tecnol.*, vol. 7, no. 3, pp. 1–19, 2024. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n3e348>
- [7] Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical, ISO 13061-1:2014, 2014. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60063.html>
- [8] Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests, ISO 13061-2:2014, 2014. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/60064.html>
- [9] J. R. Sotomayor Castellanos and E. Mendoza González, "Módulo dinámico e índice material de tableros de densidad media comparados con madera sólida de *Pinus* spp. Evaluación con pruebas no destructivas," *Temas Cienc. Tecnol.*, vol. 26, no. 76, pp. 39–45, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.utm.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/446/1/2022-TCyT-JRSC.pdf>
- [10] U. Dackermann, R. Li, J. Elsener, and K. Crews, "A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood," *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 963–976, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>

- [11] J. Zhou, Y. H. Chui, M. Gong, et al., "Comparative study on measurement of elastic constants of wood-based panels using modal testing: choice of boundary conditions and calculation methods," *J. Wood Sci.*, vol. 63, pp. 523–538, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1645-0>
- [12] S. Saad, A. D. Yuniarti, and S. Suhasman, "Effect of Layer Structure on Physical and Mechanical Properties of Binderless Composite Plywood," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 593, p. 012012, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/593/1/012012>
- [13] Y. Kojima, A. Sakakibara, H. Kobori, et al., "Evaluating the durability performance of wood-based panels by a non-destructive bending test," *J. Wood Sci.*, vol. 62, pp. 263–269, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1545-8>
- [14] J. C. González, N. Santos, F. Gomes da Silva Junior, R. Santos Souza, and M. H. de Paula, "Growth ring width of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and its relationship with wood properties," *Sci. For.*, vol. 46, no. 118, pp. 309–317, 2018. <https://doi.org/10.18671/scifor.v46n120.15>
- [15] C. Guan, J. Liu, H. Zhang, X. Wang, and L. Zhou, "Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of full-size wood composite panels supported on two nodal-lines using a vibration technique," *Constr. Build. Mater.*, pp. 64–72, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.086>
- [16] T. Ozyhar, S. Hering, S. J. Sanabria, and P. Niemz, "Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves," *Wood Sci. Technol.*, vol. 47, pp. 329–341, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0499-2>
- [17] R. de la Cruz-Carrera, A. Carrillo-Parra, J. Á. Prieto-Ruíz, F. J. Fuentes-Talavera, F. Ruiz-Aquino, and J. R. Goche-Télles, "Modulus of Elasticity in Plywood Boards: Comparison between a Destructive and a Nondestructive Method," *Forests*, vol. 15, p. 1596, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15091596>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor declara que utilizó la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT para asistirse en la redacción de este artículo y traducción de textos. Esta herramienta le ayudó a mejorar la estructura y la claridad del texto. Los contenidos generados por la IA fueron revisados minuciosamente por él para asegurar precisión y coherencia con el objetivo del estudio.

Control de calidad del concreto hidráulico en edades tempranas, utilizando el ensayo ultrasónico

Quality control of hydraulic concrete at early ages using ultrasonic testing



Luis Carlos Calvo-Navarro¹

Fecha de recepción: 8 de mayo, 2025
Fecha de aprobación: 5 de octubre, 2025

Calvo-Navarro, L.C. Control de calidad del concreto hidráulico en edades tempranas, utilizando el ensayo ultrasónico. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 111-122.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.7951>



¹ Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción. Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
 lccalvo@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0005-6793-0741>

Palabras clave

Concreto; contenido de aire; control de calidad; onda ultrasónicas; pulso ultrasónico; tiempo de curado; velocidad ultrasónica.

Resumen

El ensayo ultrasónico en el concreto permite determinar una clasificación de calidad, basándose en la magnitud de la velocidad del pulso ultrasónico desde un sensor piezoeléctrico que emite el pulso, hacia otro sensor que lo recibe, atravesando el material analizado. Cualquier discontinuidad que aporte aire a la ruta del pulso afectará el resultado obtenido, debido a que las ondas ultrasónicas no viajan a través del aire. Por tanto, los procesos de diseño, mezcla, colocación y curado del concreto pueden influir en el porcentaje de contenido de aire atrapado dentro de la mezcla o dentro del elemento colado. El presente trabajo, compara los resultados de resistencia a la compresión con el desarrollo de velocidad ultrasónica durante el período de endurecimiento del concreto, para determinar la utilidad del ensayo ultrasónico para el control de calidad de obra constructiva nueva, y así tener resultados confiables de aceptación. El concreto analizado tiene un $f'c$ 210 kg/cm² hecho en batidora estacionaria y el tiempo de curado del concreto es de 28 días. Se logra determinar la confiabilidad del ensayo ultrasónico para la inspección de obra constructiva desde los 7 días de ejecución de las coladas, permitiendo una garantía temprana de la calidad del concreto o una resolución pronta ante resultados adversos detectados por este ensayo no destructivo.

Keywords

Concrete; air content; quality control; ultrasonic wave; ultrasonic pulse; curing time; ultrasonic speed.

Abstract

The ultrasonic test on concrete allows determining a quality classification, based on the magnitude of the ultrasonic pulse velocity from a piezoelectric sensor that emits the pulse, to another sensor that receives it, passing through the analyzed material. Any discontinuity that adds air to the pulse path will affect the result obtained, since ultrasonic waves do not travel through air. Therefore, the design, mixing, placing and curing processes of the concrete can influence the percentage of air content trapped within the mix or within the cast element. The present work compares the compressive strength results with the development of ultrasonic velocity during the hardening period of the concrete, to determine the usefulness of ultrasonic testing for quality control of new construction work, in order to have reliable acceptance results. The analyzed concrete has a $f'c$ 210 kg/cm² made in a stationary mixer and the concrete curing time is 28 days. It is possible to determine the reliability of the ultrasonic test for the inspection of construction work from 7 days after the casting, allowing an early guarantee of the quality of the concrete or a prompt resolution of adverse results detected by this non-destructive test.

Introducción

El ensayo ultrasónico en el concreto es un método de inspección no destructiva que analiza la uniformidad de un material mediante el fenómeno físico de la propagación de ondas a través de un medio. El resultado obtenido se expresa usualmente en unidades de tiempo (μs) o de velocidad (m/s). Este ensayo utiliza un equipo especial que genera un pulso ultrasónico que es transmitido a través de la matriz del material. De manera muy generalizada, se puede

caracterizar la calidad de un concreto de acuerdo con su respuesta ante el ensayo ultrasónico, ya que, los concretos con mayor densidad y menor contenido de vacíos o discontinuidades tienen valores de velocidad ultrasónica altos. De manera inversa, concretos con baja densidad y altos niveles de porosidad, vacíos o agrietamientos presentan velocidades ultrasónicas bajas.

Es común utilizar el ensayo ultrasónico para caracterizar la calidad de estructuras que ya tienen años de construidas, pero también podemos usarlo para verificar la calidad del concreto de obras en proceso de construcción y dentro del período de curado del concreto, complementando los resultados de resistencia a la compresión derivados de probetas cilíndricas. Incluso en ausencia de datos de compresión, el ensayo ultrasónico permite calificar la calidad del concreto basándose únicamente en su resultado de velocidad ultrasónica.

El presente trabajo, analizó el desarrollo de velocidad ultrasónica a través del período de endurecimiento del concreto y se comparó con el desarrollo de resistencia a la compresión, estableciendo edades idóneas para la inspección de obra nueva por medio del ensayo ultrasónico, que permitan calificar la calidad del concreto sin depender del desarrollo de resistencia a la compresión. El ensayo ultrasónico en el concreto tiene como ventaja su posibilidad de ejecución en sitio, un procedimiento no invasivo, reportes en tiempo real y alta precisión en sus datos, permitiendo una toma de decisiones oportuna. Los datos experimentales utilizaron la escala de clasificación del concreto de Maholtra & Carino, 2004, aunque existen otras escalas de clasificación como la aportada por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés), aunque existe poca diferencia entre sus rangos de clasificación. El cuadro 1 muestra la dos escalas mencionadas que a la postre son las más recientes.

Cuadro 1. Clasificación de calidad del concreto.

Clasificación de calidad	Velocidad de onda ultrasónica (m/s)	
	IAEA, 2002 [2]	Maholtra & Carino, 2004 [1]
Excelente	> 4500	> 4575
Buena	3500 – 4500	3660 – 4575
Regular	3000 – 3500	3050 – 3660
Pobre	2000 – 3000	2135 – 3050
Muy Pobre	< 2000	< 2135

Marco teórico

Generalidades

El ensayo ultrasónico describe su procedimiento de ensayo de acuerdo con estándares internacionales reconocidos. La norma ASTM C597-22 *Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*, de la *ASTM International*, indica que, la prueba ultrasónica sirve para la “determinación de la velocidad de propagación de pulsos de ondas de tensión ultrasónicas longitudinales a través del concreto” [3]. La norma EN 12504-4:2021 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos, indica que; el método de prueba determina “la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas o de ondas transversales ultrasónicas en el hormigón endurecido” [4].

Propagación de ondas

La propagación de las ondas ultrasónicas a través de un medio se relaciona con las propiedades elásticas del material y su densidad, siempre y cuando el medio sea elástico, isotrópico e ilimitado. La relación de dichas características se muestra en la ecuación 1 [5]:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \tag{1}$$

V = Velocidad de propagación de ondas

E = Módulo de elasticidad

μ = Coeficiente dinámico de Poisson

ρ = Densidad del material

El problema surge cuando el concreto, se comporta como un material heterogéneo con múltiples características físicas, debido a la presencia de una variedad de materiales como el cemento, agregados, agua e incluso el acero. Por tanto, la manera de determinar la velocidad del pulso ultrasónico a través de medios anisotrópicos implica magnitudes que se obtienen al utilizar el equipo ultrasónico: el tiempo que dura la onda ultrasónica en viajar dentro del medio y la distancia entre los transductores. Por analogía, la ecuación para la velocidad ultrasónica en elementos de concreto es la siguiente (ecuación 2) [3]:

$$V = \frac{d}{t} \tag{2}$$

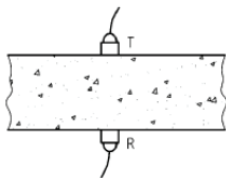
V = Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)

d = distancia entre los transductores (m)

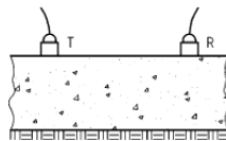
t = tiempo de vuelo de la onda ultrasónica (s)

Metodología ultrasónica

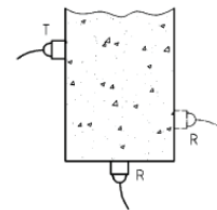
La colocación de los sensores piezométricos se puede realizar utilizando tres métodos distintos: directo, semidirecto e indirecto, como se muestra en la Figura 1. El método directo y semidirecto permiten obtener información de las ondas ultrasónicas que atraviesan la matriz del concreto, mientras que el método indirecto solo obtiene información de las ondas más superficiales liberadas por el sensor.



Método Directo



Método Indirecto



Método Semidirecto

Figura 1. Métodos de inspección ultrasónica en concreto. Fuente, [5]

Se conoce bien la teoría de la transmisión directa, que conserva una mayor energía de la onda ultrasónica transmitida y donde la trayectoria de las ondas es recta entre los dos transductores. Esta metodología provee resultados muy fiables y precisos. Al comparar las velocidades de transmisión de los diferentes métodos ultrasónicos, la posición relativa de los transductores en el método directo se beneficia de la utilidad de las ondas longitudinales o de compresión, que, son las deseables para este ensayo no destructivo. [6]

El método directo ofrece la manera más eficiente de controlar el tiempo de vuelo de los pulsos ultrasónicos, debido a que presenta una mayor sensibilidad y una ruta de viaje mejor definida [7]. La Figura 2 muestra el esquema de ejecución del ensayo ultrasónico en una probeta cilíndrica.

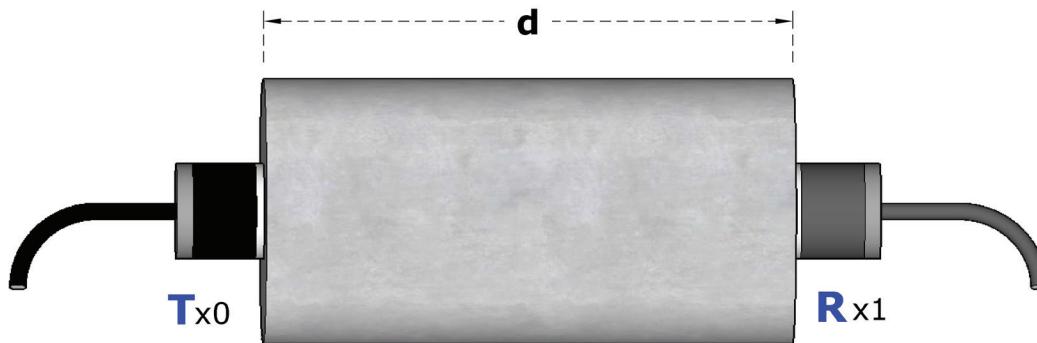


Figura 2. Esquema de la prueba por metodología directa en probetas cilíndricas.

Materiales y métodos (metodología)

Tipo de investigación

El presente trabajo define sus conclusiones a través de resultados cuantitativos, los cuales se obtienen a partir de métodos de investigación experimentales. El tipo de investigación se clasifica como aplicado, ya que busca la utilización de los conocimientos adquiridos al analizar el fenómeno estudiado [8]. Los resultados demuestran la utilidad del ensayo ultrasónico para el control de calidad del concreto en obras nuevas, y determina la edad desde la cual, el concreto ya puede ser inspeccionado con el método ultrasónico, con resultados confiables para la toma de decisiones.

Población y muestreo

La población analizada es el concreto de 210 kg/cm², el cual es el parámetro mínimo de resistencia a compresión definido por el Código Sísmico de Costa Rica 2010 en su sección 8.1.2 [9]; además, dicha resistencia es considerada f'_c , por lo cual, la edad de 28 días determina el período máximo en el cual se ejecutarán mediciones del desarrollo de resistencia y su consecuente análisis del desarrollo de velocidad de onda ultrasónica. Se realizaron mediciones en edades intermedias dentro del proceso de ganancia de resistencia, pero ninguna de ellas menor a las 24 horas desde el moldeo de los especímenes.

La guía ACI 214 cita a su vez la guía ACI 318 indicando que, la cantidad mínima de especímenes necesarios para la evaluación de resistencia es de dos cilindros por edad [10] [11]. La norma ASTM C39 indica que se pueden utilizar dos cilindros para edades inferiores a la de diseño y tres cilindros para la edad de diseño. [12]

La elaboración del concreto y el muestreo respectivo, se ejecutó en las instalaciones del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO), adscrito a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica. El CIVCO se encuentra acreditado bajo las normas ISO/IEC 17025:2017 e ISO/IEC 17020:2012, y por ende, su sistema de gestión de calidad sigue procedimientos normalizados para la ejecución de las labores, demostrando competencia técnica en la elaboración de muestreos y ajustando sus ensayos a parámetros de precisión e incertidumbre. Debido a los criterios antes descritos se obtuvieron 3 probetas por cada edad de ensayo, de manera que a nivel estadístico un promedio de datos se obtenga de entre 3 probetas, donde cada ítem equivale a un 33,3% de muestra, y que, en caso de un valor atípico (*outlier*), la cantidad de muestras remanentes todavía evoquen una mayoría porcentual. La cantidad de muestras por cada batida de concreto realizado se describe en el cuadro 2.

Cuadro 2. Tamaño de muestra para cada batida de concreto.

Edad de análisis	1 día	3 días	7 días	10 días	14 días	21 días	28 días	Total
Cantidad de muestras	2 ²	3	3	3	3	3	3	20

Diseño de mezcla de concreto

El diseño de mezcla de concreto se elaboró mediante las recomendaciones de la “Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y masivo” ACI 211.1-91 [13]. Se utilizaron tres tamaños máximos nominales (TMN) de agregado grueso utilizados en la construcción en general, permitiendo una mayor generalización del concreto $f'c$ 210 kg/cm² y verificar si había una disminución en la velocidad ultrasónica que se pudiera atribuir al cambio de TMN, de acuerdo con los valores de aire atrapado dentro del concreto descritos en la tabla A1.5.3.3 del ACI 211.1-91 [13].

Ejecución de ensayos

La fase experimental del presente trabajo se estratificó en varias etapas secuenciales descritas en la Figura 3.

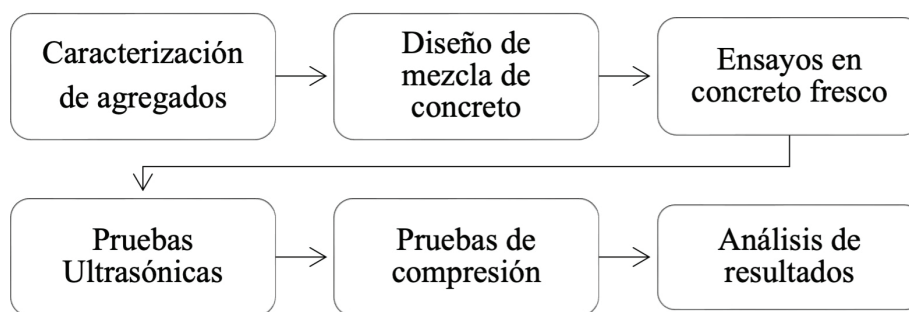


Figura 3. Esquema de la fase experimental del trabajo de investigación.

2 La evaluación a 24 horas de edad puede presentar una mayor variabilidad debido a que el proceso de curado inicial no mantiene condiciones iguales para las tres batidas, ya que las muestras continúan en sus moldes y no dentro de una cámara húmeda con condiciones controladas. Las pruebas ultrasónicas y de compresión a 24 horas se efectuaron justo al momento del desencofrado.

Resultados

La evaluación de probetas cilíndricas brindó resultados tanto de resistencia a la compresión como de velocidad ultrasónica. Estos resultados se grafican para observar las curvas de desarrollo a través del tiempo de curado del concreto. Los resultados de los tres concretos con diferente TMN, cumplen con la resistencia de diseño solicitada y mantienen una curva típica de desarrollo de resistencia a la compresión. Los resultados de resistencia se presentan en el cuadro 3 y la Figura 4.

Cuadro 3. Resultados promedio de resistencia a la compresión.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Promedio
1 día	kg/ cm ²	32,4	33,5	28,1	31,3
3 días		74,8	82,2	79,0	78,6
7 días		123	129	129	127
10 días		151	155	149	152
14 días		161	175	171	169
21 días		180	199	196	192
28 días		217	220	223	220

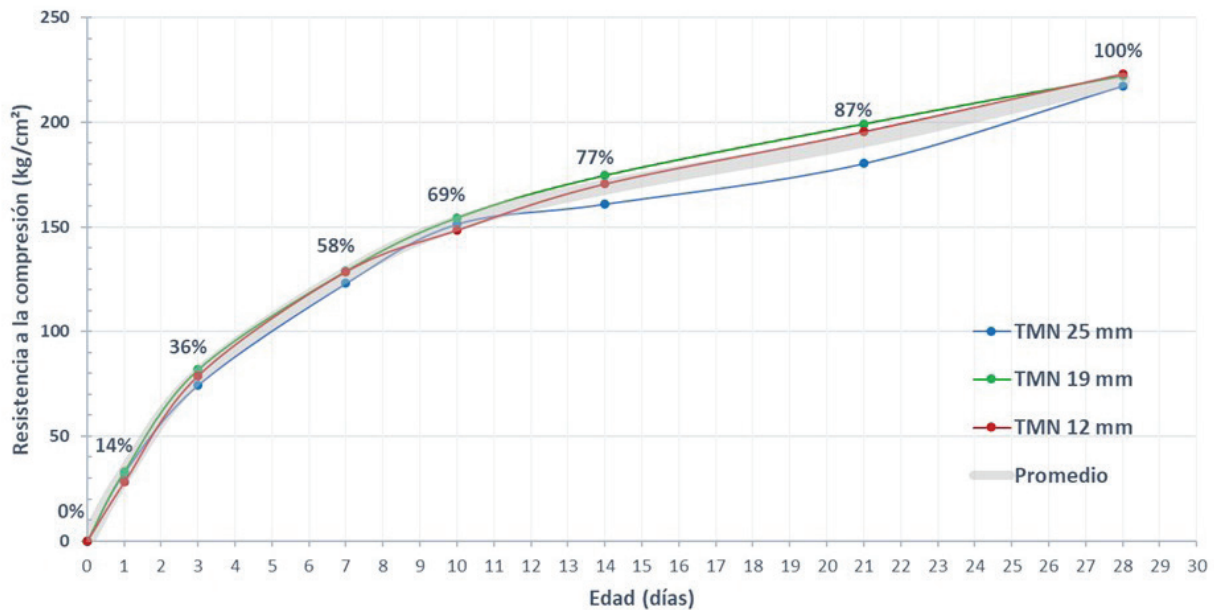


Figura 4. Desarrollo de resistencia a la compresión en los concretos analizados.

En el caso de la velocidad ultrasónica, los tres concretos muestran una diferencia visualmente notoria en los resultados obtenidos, pero la curva de desarrollo de velocidad ultrasónica sigue la misma evolución a través del tiempo para cualquiera de los concretos analizados. Las tres mezclas de concreto alcanzan la clasificación de Bueno, según los criterios de Maholtra & Carino. [1], ya que a partir de los 3660 m/s, el concreto ingresa a esta clasificación. Los resultados de velocidad ultrasónica se presentan en el cuadro 4 y se grafican en la Figura 5, comparando los resultados con la escala de clasificación de Maholtra & Carino [1].

Cuadro 4. Resultados promedio de velocidad ultrasónica.

TMN		25 mm	19 mm	12 mm	Promedio
1 día	m/s	2548	2448	2819	2607
3 días		3641	3396	3347	3464
7 días		3831	3674	3574	3683
10 días		3929	3784	3603	3767
14 días		4095	3863	3703	3869
21 días		4176	3913	3739	3890
28 días		4231	3963	3808	3940

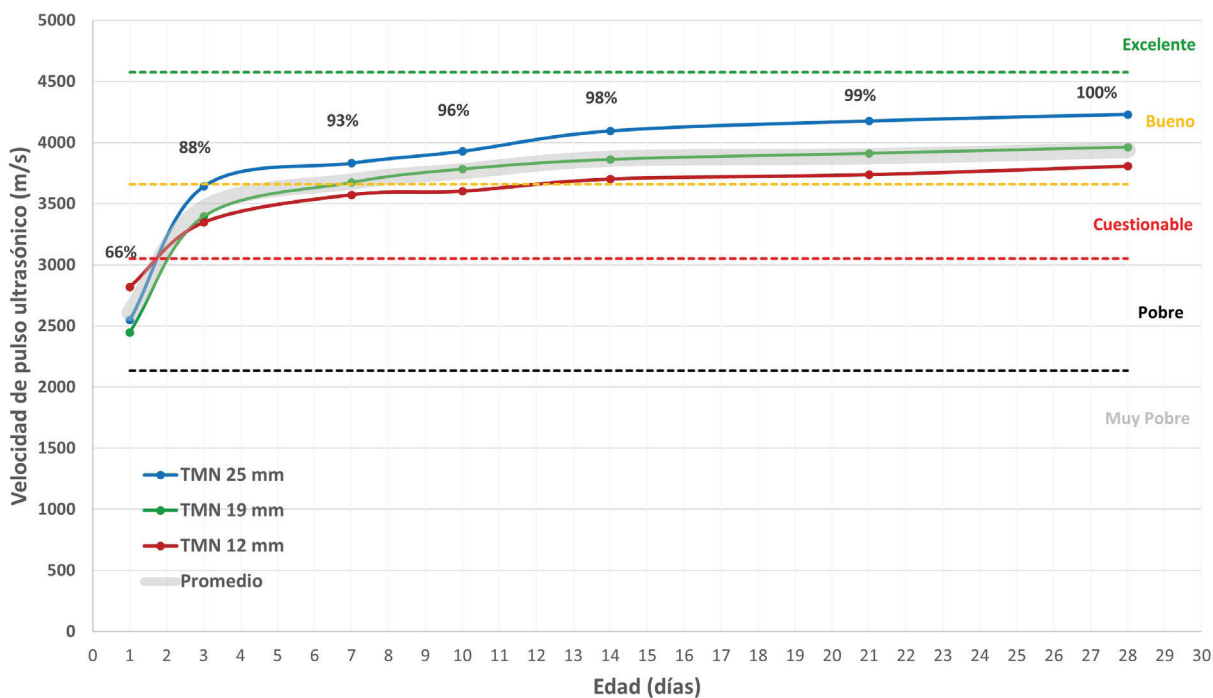


Figura 5. Desarrollo de velocidad ultrasónica en los concretos analizados y su comparación con la clasificación de Maholtra & Carino, 2004.

Tomando la edad de 28 días como la máxima ganancia, tanto de resistencia a la compresión como de la velocidad ultrasónica, se tabulan los porcentajes de ganancia en cada edad en la que se ejecutaron los ensayos. El cuadro 5 y la Figura 6 muestran este comparativo.

Cuadro 5. Porcentajes de ganancia de las magnitudes estudiadas a través del tiempo.

Edad (días)	Ganancia resistencia a la compresión	Ganancia velocidad ultrasónica	Velocidad ultrasónica Promedio (m/s)	Clasificación [1]
1	14 %	66 %	2607	Pobre
3	36 %	88 %	3464	Cuestionable
7	58 %	93 %	3683	Bueno
10	69 %	96 %	3767	Bueno
14	77 %	98 %	3869	Bueno
21	87 %	99 %	3890	Bueno
28	100 %	100 %	3940	Bueno

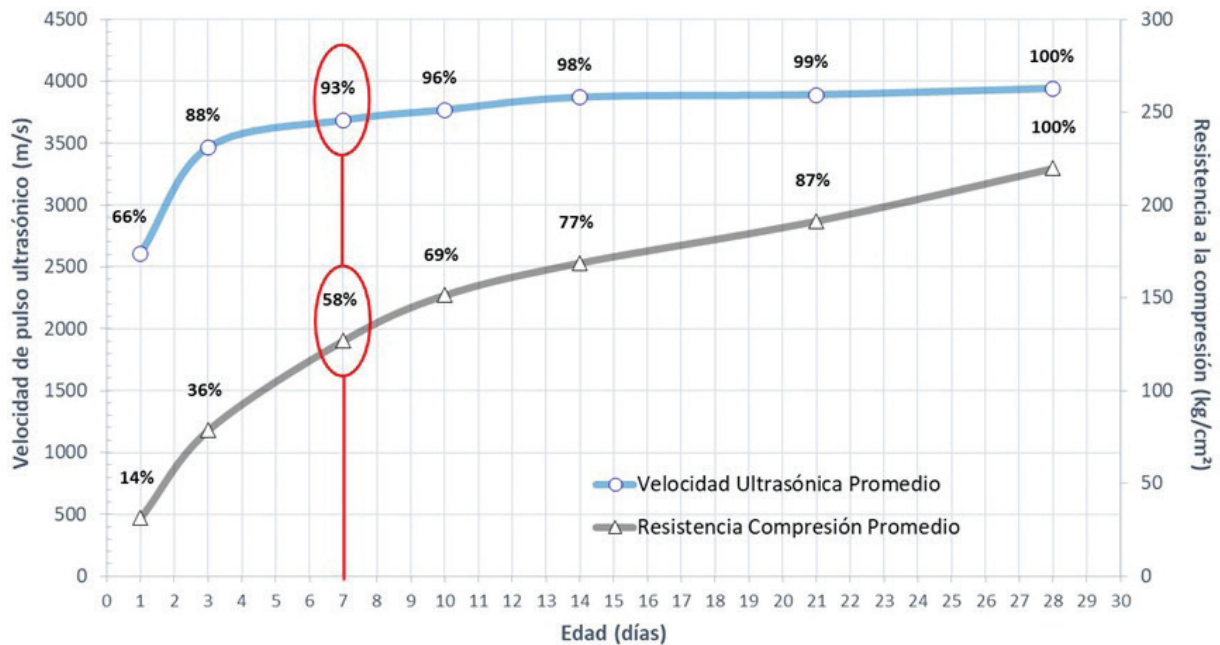


Figura 6. Desarrollo porcentual de velocidad ultrasónica y resistencia a la compresión en el tiempo.

Discusión

El análisis de los porcentajes de ganancias obtenidos a partir de las curvas de desarrollo promedio nos permite visualizar que, un concreto $f'c$ 210 kg/cm² con 7 días de colado, desarrolla un 58% de la resistencia a la compresión esperada a 28 días y, en el caso de la velocidad ultrasónica, para la misma edad, se tiene un 93% de ganancia. Mientras la curva de resistencia a la compresión aún le falta un 42% de desarrollo, la velocidad ultrasónica solo tendrá un incremento de 7% en los siguientes 21 días. La edad de 7 días se posiciona como un buen punto de partida para la inspección de concreto recién colado mediante el ensayo ultrasónico. Las edades de 1 y 3 días no se consideran ideales para una inspección ultrasónica debido a que en ellas ocurren los mayores incrementos de velocidad ultrasónica.

En cuanto a clasificación de calidad, la edad de 7 días nos presenta un valor de velocidad ultrasónica promedio de 3683 m/s, clasificándose el concreto como Bueno, y al finalizar el período de 28 días, la velocidad ultrasónica tiene un valor de 3940 m/s, manteniéndose en la misma escala de clasificación. No ocurre así con la resistencia a la compresión, que entre 7 y 28 días aún tiene un margen de crecimiento considerable.

Sin compararnos el ensayo ultrasónico con otro ensayo no destructivo que pueda brindarnos parámetros de calidad del concreto de obra nueva, podríamos utilizar la esclerometría (martillo Schmidt) que mediante un mecanismo de rebotes nos permite obtener la dureza superficial del concreto evaluado; sin embargo, esta metodología tiene algunas limitaciones como: el requerimiento de una superficie lisa donde el mecanismo golpea, el tamaño y espesor del elemento evaluado, la edad del concreto ya que la ejecución del ensayo en edades tempranas o con resistencias bajas pueden dañar la superficie del elemento analizado [1] y por último, la precisión del ensayo, que tiene cierta permisividad en el rango de resultados admitido. En contraparte, el ensayo ultrasónico es un equipo que se calibra previo a la ejecución del ensayo, utiliza una variedad de acoplantes con cierta viscosidad que permite garantizar el contacto con la superficie de concreto, las diferencias en el tamaño o espesor de un elemento se pueden solventar modificando la frecuencia del transductor utilizado y la precisión admitida por norma debe ser inferior al 2%. Los análisis de esta investigación se obtuvieron a partir de 20 probetas por concreto colado, para un total de 60 probetas. En ellas se ejecutaron 810 determinaciones ultrasónicas con una variabilidad de los resultados de entre 0,32% y 1,97%, dependiendo del concreto y edad analizados.

Conclusiones

La relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad ultrasónica no es proporcional para todas las edades. En edades tempranas, la velocidad ultrasónica aumenta rápidamente, mientras que, a partir de los 7 días de edad, mantiene un comportamiento bastante lineal hasta los 28 días. La resistencia a la compresión no tiene este comportamiento, sigue una curva ascendente bastante gradual a través del tiempo y su pendiente dependerá del proceso de reacción química inherente al endurecimiento del concreto hidráulico y su proceso de curado.

Utilizando la clasificación del concreto según Maholtra y Carino [1], se determina que, a 7 días de edad, un concreto convencional $f'c$ 210 kg/cm², ya tiene una Buena calificación de calidad, y en los 21 días restantes solo desarrollará en promedio 7% más de velocidad, lo cual mantendrá su calificación invariable. Si se inspecciona un concreto de obra nueva a los 7 días de edad, un valor de velocidad ultrasónica aceptable permite una confianza en el proceso ejecutado sin realizar una inspección invasiva. En caso de obtenerse un resultado de velocidad ultrasónica deficiente, tenemos un alto nivel de confianza para tomar decisiones prontas, sin la necesidad de esperar 28 días para el desarrollo de resistencia a la compresión.

La velocidad ultrasónica depende en gran medida de la elaboración de la mezcla de concreto y la colocación dentro de los elementos estructurales a construir, ya que se debe evitar que estos procesos generen aire dentro del concreto, vacíos por evaporación del agua (curado incorrecto) o discontinuidades que generen agrietamiento interno o externo en la estructura colada. Cualquiera de estas fallas iniciales puede afectar el proceso de densificación del material o la respuesta elástica del concreto, y estas variables afectan el resultado del ensayo ultrasónico.

La ejecución del ensayo ultrasónico es preferible mediante el método directo, ya que el pulso ultrasónico atraviesa la matriz del material analizado completamente. Realizar inspecciones ultrasónicas en obras recién construidas, con edades de entre 7 y 10 días, garantiza que aún no se colocan instalaciones mecánicas, repellos o acabados que eviten el correcto acoplamiento

de los transductores ultrasónicos o que eviten alcanzar caras opuestas de la estructura a analizar. Lo anterior permite realizar una mayor cantidad de ensayos en una sola inspección, mayor cobertura de elementos estructurales y resultados en tiempo real, con alta confiabilidad estadística.

Recomendaciones

El ensayo ultrasónico se puede utilizar para inferir resistencia a la compresión, pero se requiere acompañar la inspección ultrasónica con la ejecución de muestras de concreto en probetas que permitan la correlación. Incluso una muestra patrón con la calidad deseada, puede ser insumo para una evaluación comparativa mediante el ensayo ultrasónico. En ausencia de muestras para resistencia a la compresión, el ensayo ultrasónico aún provee parámetros de calidad y confianza en sus resultados sin importar la edad de ensayo.

A pesar de la modernización de los equipos de medición y la mejoras tecnológicas que ofrecen los dispositivos de inspección no destructiva en la actualidad, el control de calidad del concreto en nuestro país sigue determinándose casi en su totalidad, por la resistencia a la compresión del concreto. A pesar de esta aseveración, el control de calidad del concreto no es una constante en los proyectos constructivos hoy en día, y se justifica la experiencia, los diseños de mezcla empíricos o la subcontratación, para no evaluar la calidad del concreto o para realizar solo una muestra al inicio del proyecto que representa globalmente el diseño de mezcla utilizado, sin considerar las variables que afectan la uniformidad de las batidas de concreto.

En la actualidad, se desea eficiencia y eficacia en el proyecto constructivo, pero en ocasiones esto justifica algunas falencias de ejecución, monitoreo y control. Esta investigación propone una forma innovadora de brindar inspección de calidad, sin ser invasivos en el proceso de construcción y que puede generar conclusiones confiables sin depender obligatoriamente de la resistencia a la compresión.

Trabajo futuro

- El ensayo ultrasónico también admite el método indirecto de inspección, y algunos elementos de concretos como losas y muros pueden solamente revisarse bajo este método. Se puede promover la investigación del porcentaje de ganancia de velocidad ultrasónica por medio del método indirecto y correlacionarla tanto con la resistencia a la compresión, como con los valores de velocidad ultrasónica por método directo.
- Investigar otras resistencias de diseño (f'_c) del concreto, pueden brindar un mayor alcance de los comportamientos y tendencias del ensayo ultrasónico. Este trabajo se limitó a la resistencia de 210 kg/cm², dado que es el más común en obra convencional.
- Algunos elementos estructurales de tipo prefabricado, pretensado o postensado solo pueden revisarse en campo, y a su vez, utilizan concretos con aditivos que incrementan resistencia, reducen el agua requerida para la mezcla, retardan el proceso de fraguado o lo aceleran. Investigar la respuesta del ensayo ultrasónico en este tipo de elementos o de concretos adicionados puede brindarnos nuevas aplicaciones de uso para los ensayos no destructivos.
- Dada la sensibilidad del ensayo ultrasónico a detrimentos de densidad o al aumento del aire dentro de una estructura de concreto, se puede sugerir la investigación de concretos que han sido expuestos al eventos de incendio o a diversas patologías que pueden mermar la capacidad estructural del concreto, y que, a partir de la prueba ultrasónica pueda determinarse la calidad remanente y la viabilidad o no de restaurar o reutilizar una estructura dañada.

Agradecimientos

Se agradece a la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica por el soporte brindado para la ejecución de esta investigación, así como al Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción por el aporte del equipo ultrasónico, instalaciones del laboratorio y tiempo de ejecución.

Referencias

- [1] International Atomic Energy Agency, «Guidebook on non-destructive testing of concrete structures,» Vienna, 2002.
- [2] V. M. Maholtra y N. Carino, *Nondestructive Testing of concrete*, Florida: CRC Press, 2004.
- [3] ASTM International, «Designation C597 – 22 Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete,» 2022.
- [4] Asociación Española de Normalización, «EN 12504-4:2021 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos,» Madrid, 2022.
- [5] A. Domato Jayo, «Ultrasonidos: principios generales y alcance,» International Atomic Energy Agency (IAEA), 2022.
- [6] J.-L. Henry y A. Aguado De Cea, «Optimización del control de la resistencia del hormigón de la obra de la depuradora del Besós mediante ultrasonidos,» Barcelona, 2003, pp. 28-61.
- [7] O. Carrasco y A. Freitas , «Evaluación de la influencia del acero de refuerzo en la aplicación del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico en elementos de concreto armado,» Caracas, 2014.
- [8] O. Narváez Trejo y L. Villegas Salas, «Introducción a la investigación:,» Universidad Veracruzana, 2014.
- [9] Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, Código Sísmico de Costa Rica, Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2010.
- [10] American Concrete Institute, «Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11),» United States, 2011.
- [11] American Concrete Institute, «Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318SUS-14) y Comentario (ACI 318SUSR-14),» United States, 2015.
- [12] ASTM International, «Designation C39/C39M – 24 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» 2024.
- [13] American Concrete Institute, «Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweighth, and Mass Concrete (ACI 211.1-91),» 2002.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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

El frijol nativo de Matambú, Guanacaste, Costa Rica: una mirada sociocultural







Common bean landraces in Matambú, Guanacaste, Costa Rica: a sociocultural perspective

Susana Campo-Molina¹, Vania Solano-
Laclé², José Eladio Monge-Pérez³

Fecha de recepción: 12 de julio, 2025
Fecha de aprobación: 23 de octubre, 2025

Campo-Molina, S; Solano-Laclé, V; Monge-Pérez, J.E. El frijol nativo de Matambú, Guanacaste, Costa Rica: una mirada sociocultural. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 Nº 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 123-139.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8104>

- 1 Vicerrectoría de Extensión, Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica.
 scampo@uned.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0007-9416-0628>
- 2 Escuela de Antropología y Centro de Investigaciones Antropológicas, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 vania.solano@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0007-1429-5267>
- 3 Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
 jose.mongeperez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>



Palabras clave

Frijol común; semillas criollas; variedades nativas; conservación; Mesoamérica.

Resumen

El objetivo fue realizar una valoración sociocultural sobre la producción, uso y consumo del frijol nativo (*Phaseolus vulgaris* L.) en el territorio indígena de Matambú, ubicado en los cantones de Nicoya y Hojancha, Guanacaste, Costa Rica. El trabajo se desarrolló de noviembre 2012 a diciembre 2014. Se realizaron 45 entrevistas semiestructuradas a agricultores de la comunidad, además de talleres, conversatorios y recorridos de campo. Se describen las prácticas de cultivo, cosecha y almacenamiento, variedades nativas utilizadas, selección y conservación de la semilla, y los usos socioculturales, así como el efecto de la tenencia de la tierra y el relevo generacional, sobre la producción de frijol nativo en Matambú. Se enumeran los retos que enfrentan los productores de frijol nativo de Matambú, y se enfatiza su importancia en la conservación de los recursos fitogenéticos y de las tradiciones culturales chorotegas.

Keywords

Common bean; creole seeds; landraces; conservation; Mesoamerica.

Abstract

The objective was to carry out a sociocultural assessment of the production, use and consumption of native bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the indigenous territory of Matambú, located in the Nicoya and Hojancha cantons, Guanacaste Province, Costa Rica. The work was carried out from November 2012 to December 2014. 45 semi-structured interviews were carried out with farmers from the community, in addition to workshops, conversations and field trips. Cultivation, harvest and storage practices, native varieties used, seed selection and conservation, and sociocultural uses, are described, as well as the effect of land tenure and generational change, on native bean production in Matambú. The challenges faced by native bean producers in Matambú are listed, and their importance in the conservation of plant genetic resources and Chorotega cultural traditions is emphasized.

Introducción

El territorio de Matambú, de población de la tradición cultural mesoamericana, la cual se autoidentifica mayormente como perteneciente al pueblo chorotega, fue reconocido como reserva indígena por el gobierno de Costa Rica, a través del Decreto 6036-G del 26 de mayo de 1976 y posteriormente, mediante la Ley 6172 del 29 de noviembre de 1977. Posee una extensión de 1623,9 ha, se localiza en los cantones de Hojancha y Nicoya, provincia de Guanacaste, Costa Rica, y su zona de vida corresponde al bosque húmedo [1]. Los suelos de este territorio son mayoritariamente alfisoles, por lo que presentan alto contenido de arcilla y baja fertilidad [2].

El cultivo del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es importante para la dieta alimenticia debido a sus propiedades nutricionales y medicinales [3]; contiene una gran cantidad de proteínas, fibras, minerales (calcio, hierro, fósforo, magnesio, potasio, cobre y zinc), vitaminas (ácido fólico, niacina y tiamina), y carbohidratos [4] [5] [6] [7] [8] [9]. Es originario de América, donde se pueden encontrar poblaciones silvestres desde México hasta Argentina, y pertenece a la familia Leguminosae [10] [4]. Según hallazgos arqueológicos, el frijol se conocía en México

y Sudamérica desde hace al menos 5000 años [11] [4] [12]. Esta leguminosa representa una importante fuente alimenticia, en especial para las poblaciones más pobres de África y América Latina [13].

Se ha documentado que, en la zona de Nicoya, en el año 1548, las poblaciones nativas debían pagar como tributo indígena a la corona española una cierta cantidad de frijol por año, además de otros productos como maíz, miel, cera, sal, gallinas, tejidos y objetos de cerámica [14]. El territorio indígena de Matambú se encuentra ubicado en esta zona de la provincia de Guanacaste, Costa Rica. En el caso de México, también los aztecas exigían el frijol común como tributo a otros pueblos vecinos [5].

En términos agronómicos, la diversidad de poblaciones silvestres de frijol común es un recurso importante para el mejoramiento genético, pues muchas de ellas poseen genes de tolerancia a factores adversos como el frío, la sequía, el calor, las plagas y las enfermedades [15] [10]. Las variedades criollas se derivan a partir de una variedad originalmente mejorada, pero que luego se convierten en variedades tradicionales, a través de numerosos ciclos de siembra y selección de semillas por las familias agricultoras; dicha labor de selección es realizada por estas de manera empírica y se lleva a cabo mediante procesos de conservación anual de la semilla, lo que convierte este material en variedades nativas. Otros autores indican que este tipo de semillas no se derivan de procesos de mejora genética formal, y presentan diversidad genética, adaptación a condiciones locales, y asociación con sistemas tradicionales de cultivo [15]. Generalmente, se considera que se requiere cultivar una variedad por un período de entre treinta a cien años para que se pueda considerar como una variedad nativa [15]. Su diversidad se manifiesta en numerosos y combinados colores de semillas de frijoles [4] [16].

Las variedades criollas de frijol poseen gran importancia gracias a su diversidad y sus características de rusticidad; dicha diversidad se ha desarrollado a lo largo del tiempo como respuesta ante factores ambientales que limitaban el rendimiento. Estas características ventajosas han permitido a los productores de zonas con condiciones ambientales vulnerables, quienes no comercializan grandes volúmenes de grano, conservar y utilizar estos frijoles nativos [17]. La conservación de frijoles nativos constituye un elemento importante en la estrategia de adaptación al cambio climático, pues las familias agricultoras los han ido adecuando a las condiciones particulares del lugar y zona de vida con el paso del tiempo, y también porque responden a las preferencias alimenticias de la población [13].

Estas variedades criollas y nativas del frijol, a pesar de ser cultivadas y apreciadas en ciertas áreas y mercados locales, han sido poco estudiadas [10] [18] [19]. No obstante, algunos autores han investigado las variedades nativas de frijol común en cuanto a sus características y usos [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [17] [5] [12] [7] [27]. En relación con los estudios realizados en el territorio indígena de Matambú, se realizó una evaluación del efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento de seis frijoles nativos [28], así como la caracterización de sus semillas [29].

Nuestro interés en conocer el estado de la diversidad agrícola asociada al frijol nativo (*Phaseolus vulgaris*) en el territorio indígena de Matambú, ubicado en los cantones de Nicoya y Hojancha, Guanacaste, Costa Rica, motivó la realización de una caracterización sociocultural sobre la producción, el uso y el consumo del frijol nativo, a partir de un trabajo multidisciplinario e interinstitucional con familias campesinas indígenas de este territorio.

Metodología

Un equipo multidisciplinar e interuniversitario de la Universidad de Costa Rica y la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica, desarrolló el proyecto de investigación-acción *Mejoramiento de la producción de hortalizas, maíz y frijol en comunidades indígenas (Territorio Indígena de Matambú)*, en el marco de la convocatoria a proyectos sobre Seguridad Alimentaria y Nutricional CSUCA- PRESANCA II, en las que se propuso contribuir con la reproducción de las prácticas agrícolas e identitarias asociadas a las variedades nativas de frijol de esta comunidad.

Desde noviembre 2012 hasta marzo 2013, se realizaron cuatro visitas al territorio indígena de Matambú, Guanacaste, Costa Rica, para mantener reuniones con la junta directiva de la Asociación de Desarrollo Integral de Matambú (ADIM), organización de gobierno local, con el fin de obtener su apoyo y aprobación para la realización de esta investigación, como parte del proceso de consentimiento informado. También, se logró definir conjuntamente las actividades a realizar, a partir de la relación con la ADIM y otras personas líderes y familias que se mostraron interesadas en participar. Desde abril 2013 hasta diciembre 2014, se realizó una caracterización sociocultural acerca de los saberes, las formas de producción, utilización y consumo del frijol nativo (*Phaseolus vulgaris*) dentro de la dieta del pueblo indígena de Matambú, así como un proceso experimental de producción de hortalizas con sustratos locales.

Se realizó observación participante durante 32 visitas a las casas de familias agricultoras, y al menos seis recorridos de campo a sus parcelas. Se aplicaron 45 entrevistas semiestructuradas a personas de la comunidad, en particular, personas agricultoras. Las entrevistas trataron los siguientes temas: variedades de semillas, selección de la semilla, prácticas de cultivo, épocas de cultivo, condiciones climáticas, cosecha y almacenamiento, preferencias culturales, control de plagas, recetas cotidianas y de uso festivo, y personas involucradas (género, edad). Para el presente artículo, la información obtenida, en relación con el frijol nativo, se tabuló y se analizó para organizarla en siete áreas temáticas. El enfoque de todo este proceso se realizó desde la investigación cualitativa; se entrevistó a todas aquellas personas que conocieron del proyecto y mostraron interés en participar y compartir sus conocimientos. La información se organizó por áreas temáticas, a saber, agronómicas, sociales, culturales, gastronómicas, entre otras. Cabe resaltar que, si bien el proyecto en mención culminó en el 2014, algunas personas de este equipo de trabajo han mantenido un vínculo y visitas a la comunidad hasta 2024, por lo que se incluyen algunos datos que persisten en este período.

Resultados y discusión

Prácticas de cultivo

El frijol es uno de los cultivos que predominan en la mayor parte del territorio indígena de Matambú, y se pueden sembrar hasta dos cosechas al año. En la primera siembra, las familias indicaron preferir cultivar el maíz a inicios del mes de mayo; sin embargo, algunos productores cultivaban en esta época tanto maíz como frijol, por separado. La fecha exacta de esa primera siembra dependía del momento del inicio de las lluvias, para lo cual se solía preparar el terreno en marzo (luego en abril), aunque esta fecha varía de un año a otro, situación que también ha sido registrada por otros autores [30]. Sin embargo, los efectos del cambio climático generaron una postergación en las fechas de preparación de la tierra y siembra; esto se confirmó también en las observaciones realizadas luego del período 2012-2014, por lo que incluso posteriormente, en el año 2024 se registra que se continúa sembrando más tarde, en mayo, dependiendo de la lectura que se hace en relación al clima.

En nuestro estudio también se encontró que, para la segunda siembra, llamada también *postrera*, se solía cultivar frijol en sitios en los que antes se había sembrado maíz, o en terrenos nuevos. Esta segunda siembra se realizaba entre la tercera semana de agosto y la segunda semana de setiembre. Otras personas investigadoras han informado que la fecha de siembra afecta significativamente el rendimiento en frijol, con disminuciones hasta del 49% entre una fecha y otra [30]. En Venezuela y México, también se informó de dos épocas principales de siembra de frijol en el año [21] [18].

Las familias productoras manifestaron que no se debía sembrar el frijol en el mismo terreno, consecutivamente. Además, el frijol aporta en recuperar la fertilidad del suelo en los terrenos donde se había sembrado maíz con anterioridad. Otros autores indican que esto garantiza que el frijol fije nitrógeno en la tierra agotada por la siembra precedente [13]. En el caso de Matambú, si las familias agricultoras disponían de tierras descansadas, se prefería rotar las parcelas. Algunas familias también sembraron el frijol junto con el maíz, como cultivos asociados.

Entre las prácticas agrícolas más comunes se dio la siembra con espeque, donde generalmente se utilizaron tres o cuatro semillas por golpe (hoyo), a una distancia promedio de 40 cm entre plantas en la misma hilera. La distancia entre hileras señalada por las personas fue diversa; se reportaron 40, 50, 60, 70, 80 y 90 cm, por lo tanto, la densidad de siembra usada por los agricultores varía entre 83.334 y 250.000 semillas/ha. En otros trabajos se han ensayado densidades de siembra entre 12.500 y 714.000 semillas/ha [30] [3] [8] [28]. Otro autor también registró en Bolivia la práctica de depositar tres semillas por hoyo de siembra en frijol [8], y en Venezuela, se halló que se acostumbra colocar cuatro semillas de frijol por hoyo [21]. En México se encontró que los productores indígenas siembran el frijol con una distancia entre hileras entre 0,8 y 1,2 m, y una distancia entre hoyos entre 0,8 y 1,0 m, y colocan entre dos y cuatro semillas por hoyo [31].

Los agricultores del territorio de Matambú generalmente no aran el terreno, debido a que siembran en parcelas con pendiente; esta misma situación se informó en una comunidad indígena de Guatemala [32]. Previo al período de la siembra, algunos agricultores realizaron una aplicación de herbicida (paraquat), dejaron reposar la tierra entre cuatro días y una semana y, posteriormente, hicieron la siembra. Sin embargo, la mayoría de los agricultores limpiaron el terreno de manera tradicional, mediante la corta de la maleza con machete, sin dejar completamente limpio el terreno, para que el rastrojo que quedaba en el suelo sirviera como abono. Al respecto, investigadores en México informaron que el 65% de los productores de frijol común controlan las malezas de forma manual (chapía) [22]. En Matambú, algunos pocos agricultores que poseen un terreno con poca pendiente, usan arado jalado por bueyes.

En Matambú, cinco u ocho días después de la siembra, se realizó la aplicación del fertilizante químico 10-30-10, y quince días después, se chapeó la maleza y se aplicó urea. En otro estudio también se informó de este deshierbe manual realizado 15 días después de la emergencia de las plantas de frijol, con ayuda de machete y azadón [8]. Posteriormente, cuando las plantas florecieron, los agricultores realizaron la última aplicación de fertilizante (urea). Algunos de ellos fertilizaron solamente dos veces, en lugar de tres: la primera, una vez puesta la semilla en el suelo y la segunda, durante el período de floración. Asimismo, en México se registró que el 65,5% de los productores de frijol aplican fertilizante químico a este cultivo [22]. Desde la siembra hasta la cosecha, transcurren aproximadamente 70 días.

La información etnográfica permitió constatar que dos o tres décadas atrás, la mayoría de las familias en la comunidad sembraba el frijol en medio del charral; se regaba la semilla y se chapeaba para que el frijol quedara *tapado*. Fertilizaban una sola vez durante todo el ciclo de crecimiento, y contaban con gran experiencia en este tipo de siembra; conocían la densidad

necesaria de maleza, la época apta para evitar que las plantas se quemaran o se llenaran de hongos, y encontraban grandes beneficios en este sistema, principalmente por el poco cuidado que requería.

Al respecto, las investigaciones de sistemas de corte y cobertura y, en particular, los sistemas de frijol *tapado* en Costa Rica, iniciaron apenas en 1979, debido a la creencia de que el sistema era rústico y sin posibilidades de mejoramiento. Entre las razones se mencionaba el difícil acceso a las áreas productoras, la situación económica de los agricultores de este sistema, el cual era percibido como limitante para la adquisición de insumos, y por la creencia de que el sistema dependía de la transición de zonas de bosque a potrero [33].

Otro autor señala también que se solía confundir con el sistema de roza y quema [34]. Este sistema de corte y cobertura que se utilizaba con el frijol en décadas pasadas en Matambú, también se encuentra en pueblos indígenas y campesinos practicado para el cultivo del maíz desde tiempos precolombinos: “consistía en la limpia (corte o roza) de parcelas en el bosque, la siembra de cultivos en el mantillo resultante, antes o después de la corta, y, en lugar de hacer una quema, utilizar la descomposición de los residuos como una fuente de nutrientes” [34].

En el período de este estudio documentamos que las capacitaciones impartidas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), y la relación con otros productores de la zona, influyeron en que la siembra se realizara principalmente con espeque, con “limpieza” del terreno, la separación de cada variedad de frijol por lote, y el uso de fertilizantes químicos. La razón principal de esta modificación fue el rendimiento de la siembra, pues cuando el frijol se tapaba, resultaba más complicado cosechar y el rendimiento era menor. Este cambio no solamente involucró la modificación de la técnica, sino también la pérdida de otro tipo de alimentos que se sembraban en el sistema del frijol *tapado*, entre ellas, algunas variedades de cucurbitáceas, como ayotes (calabazas) y pipianes, enredaderas que producían frutos y quelites usados en la dieta tradicional.

La labor de la siembra y selección de la semilla era mayormente masculina; sin embargo, algunas mujeres también participaban en la siembra y la cosecha, y la mayoría de ellas se especializaba en el proceso de desvaine del frijol y la cocción. A veces, también los niños y niñas de las familias ayudaban en algunas faenas, principalmente en la segunda fertilización, en la limpieza del terreno antes y durante la etapa de la floración, y en el desvaine, el cual se solía hacer con la uña. En otros contextos culturales, se observa que las mujeres indígenas mapuche en Chile tienen una importante contribución en la producción, conservación y preparación de alimentos, como el frijol [12]. En Matambú se evidenció una segmentación en las etapas del proceso agrícola, en las que el rol de la mujer estaba predominantemente enfocado en el desvaine, limpieza y selección del frijol que sería utilizado para la alimentación.

Las familias que sembraban frijol para el autoconsumo, por lo general utilizaban lotes de unos 500 m²; sembraban con espeque aproximadamente una lata de semillas (16 kg), de los cuales se recogían, en promedio, 13 quintales (unos 590 kg), cuando las condiciones climáticas eran favorables al cultivo y había una buena cosecha. Los productores que poseían 1-2 ha sembraban hasta cuatro latas de diversas semillas, y referenciaron una cosecha proporcional a las cantidades anteriormente mencionadas, siempre y cuando se presentaran condiciones climáticas favorables, es decir, ausencia de eventos extremos como sequías o inundaciones.

Cosecha y almacenamiento

Observamos en el campo que, una vez listo el cultivo para ser recogido, se procedió a arrancar las plantas de frijol, estas se anudaron y se dejaron secando en manojos por unos diez días, o hasta que el productor considerara conveniente iniciar con el aporreo. Otros productores prefirieron colgar las plantas en cables, en el mismo terreno, para obtener un mejor secado; un sistema similar ha sido documentado en Guatemala y El Salvador [25] [32].

El sistema de aporreo en Matambú se llevaba a cabo de la siguiente manera: se apilaban o amontonaban las plantas secas y se preparaba una manta con cuatro estacas, sosteniéndose en cada extremo de tal manera que quedaba distribuido el espacio como un “cajón”; cada extremo se aseguraba bien, con mecates, para evitar que se zafaran por la presión de los golpes. Posteriormente, dos personas preparaban un par de varas flexibles de madera, de aproximadamente 1,5 m de longitud. Colocaban los manojos secos de frijol en medio de la manta e iniciaban un proceso coordinado de golpes fuertes y continuos a las plantas para liberar la semilla de las vainas. Los desechos se dejaban en un extremo y luego eran golpeados con una vara más corta para recuperar las semillas que no se habían liberado de las vainas. Con una escoba de hojas verdes, se barría bien el frijol aporreado, sin sacar completamente la basurilla que quedaba, y se empacaba en sacos plásticos, transportados al hombro desde el terreno de la siembra hasta las viviendas. Cuando las familias contaban con bueyes, los utilizaban para transportar la cosecha hacia sus hogares. Un sistema similar de cosecha de frijol fue descrito en tres pasos: arrancado de las plantas, trilla y limpieza de los granos trillados [8]. En otro caso en México, además de este procedimiento, algunos productores realizan el soplado de las semillas para eliminar impurezas [22].

En el momento en que el frijol llegaba a las casas, las familias almacenaban en sacos o tarros plásticos, la semilla que consumirían durante el año. Por otra parte, seleccionaban y dejaban extendida al sol la semilla que almacenarían para la siguiente siembra, habitualmente la más robusta y sana. Otros autores también indicaron que el almacenaje tradicional de la semilla, sea para autoconsumo, venta o semilla para la siguiente siembra, se hace principalmente en recipientes plásticos de 20 kg de capacidad [22], agregando cal o ceniza para controlar las plagas, luego de ser asoleada [31] [19]; esto último también se documentó en Matambú. Asimismo, los granos que se utilizaban para el consumo se curaban con ajos como método repelente para ahuyentar la plaga de gorgojos; se ponía el frijol dentro del estañón y se colocaban los ajos en la boca del mismo. Cuando se almacenaban en sacos, se colocan varias “cabezas” de ajo dentro de ellos.

Según lo constatado en nuestro estudio, la semilla para siembra se almacenaba entre seis u ocho meses, según la cantidad de siembras de frijol que se habían realizado al año. Las familias que poseían tierra para sembrar y que comercializaban el producto, habitualmente cultivaban tanto en la primera siembra como en la *postrera*. La mayoría de quienes sembraban únicamente para el consumo familiar, lo hacían solo una vez, habitualmente en la *postrera*, cuando llovía menos, para evitar los hongos y las quemaduras en hojas por exceso de lluvia, en un contexto seco y soleado.

Variedades nativas

Es importante resaltar la pérdida gradual de variedades nativas de frijol. Durante las entrevistas a algunas personas mayores del territorio, se mencionó unas 12 variedades nativas de frijol que se sembraban en el pasado, de las que solamente ocho seguían utilizándose al momento del estudio, en 2014 (cuadro 1): *Sesenteno*, *Mantequilla*, *Vaina Blanca*, *Nica*, *Revuelto*, *Turrialba*, *Brunca* y *Talamanca*. Las dos últimas variedades fueron producto de programas de fitomejoramiento [11] y fueron introducidas en el territorio por el MAG en la década de 1980. El

frijol *Sesenteno* es la variedad con mayor tiempo de existencia en el territorio y la más utilizada. En el cuadro 2 se describen las características de algunas de las variedades. No se pudo establecer con precisión desde cuándo conservaban estas variedades de frijoles nativos; sin embargo, en las entrevistas realizadas se logró rastrear hasta la década de los años 1960, en algunos casos. Se ha documentado que, en zonas con condiciones ambientales desfavorables, las variedades nativas de frijol muestran un mejor comportamiento productivo, en comparación con variedades mejoradas [10]; este parece ser también el caso de Matambú, en donde la siembra se realiza en terrenos con pendiente importante, con baja fertilidad del suelo y bajo uso de insumos [28]. Otros autores han indicado que una parte importante de la producción de frijol común en América Latina se realiza en pequeñas parcelas, ubicadas en suelos de baja fertilidad y con pendiente [21].

Cuadro 1. Variedades de frijol sembradas por las familias agricultoras entrevistadas (n=45)*.

Variedad	Número de agricultores	Porcentaje de familias que utilizaban cada variedad (%)
Sesenteno	40	88,9
Brunca	12	26,7
Vaina Blanca	9	20,0
Mantequilla	8	17,8
Turrialba	7	15,6
Nica	3	6,7
Talamanca	3	6,7
Revuelto	1	2,2

*Nota: respuesta múltiple.

Otras variedades nativas, como *Cuarenteno*, *Bayo*, *Puyego* (o *Higuerillo*), *Chingo* y *Frijol de palo*, aún existen en el territorio, pero casi han dejado de ser consumidas. Solo una o dos familias conservaban algunas de estas semillas, habitualmente en la comunidad. Las variedades *Bayo* y *Puyego* (o *Higuerillo*), formaban parte de la variedad *Revuelto*.

Cuadro 2. Características de algunas variedades nativas de frijol.

Variedad	Características fenotípicas	Modo de siembra	Ventajas	Período de siembra a floración	Período de siembra a cosecha
Mantequilla	Semilla de color café claro-amarillento. Vaina amarilla-rosada. Planta arbustiva.	Distancia: 40 x 40 cm (cuatro semillas). Se siembra a partir del 20 de setiembre, con espeque.	La vaina carga muchas semillas.	45 días	60 días
Nica	Semilla de color negro y rojo. Hace una guía grande y es arbustiva.	30 cm entre calle, 30 cm entre planta. Se siembra con espeque a finales de septiembre.	Produce bien sin abono químico, rinde menos porque es muy arbustiva y las vainas no se maduran al mismo tiempo.	45 días	60 días

Variedad	Características fenotípicas	Modo de siembra	Ventajas	Período de siembra a floración	Período de siembra a cosecha
Sesenteno	Semilla de color rojo. Vaina roja. Planta arbustiva.	Distancia: 40 x 40 cm (cuatro semillas). Se siembra a partir del 20 de setiembre, con espeque.	Buena producción.	45 días	60 días
Turrialba	Semilla de color negro. Vaina blanca. Es diferente de la variedad Turrialba de vaina morada. Arbustiva, se sembraba tapado.	Distancia: 40 x 40 cm (cuatro semillas). Espeque. Se siembra a mediados de septiembre.	Buena producción.	45 días	70 días
Vaina blanca	Semilla de color rojo. Conocido también como <i>Sesenteno rojo vaina blanca</i> . No es arbustivo, echa buena raíz.	Distancia 50 cm. Tres semillas por golpe. Se siembra en mayo después de las primeras lluvias. Es una especie susceptible al hongo blanco y la <i>tortuguilla</i> (Nombre de cómo se conoce la enfermedad en la comunidad).	Muy productivo. Fue entregado a la comunidad por el MAG.	35 días	70 días
Brunca	Semilla de color negro, con flores blancas. Arbustiva y con guía larga.	La distancia depende del terreno. Si es pequeño, es de 30x30 cm, si es un terreno grande, 45x30 cm. Son tres semillas por golpe. Es mata, no hecha guías. Vaina blanca cuando inicia a madurar. Se siembra de postrema en septiembre.	Es una especie muy productiva, casi no echa raíces. Es resistente a plagas. Llevada a la comunidad por el MAG.	30 días	De 65 a 70 días
Talamanca	Semilla de color rojo. Su vaina es verde y cuando está para cosechar se vuelve rosada o rojiza.	Se siembra en una distancia de 40x40 cm por espeque, tres semillas.	Tiene buena productividad, pero demora en crecer, es resistente a plagas.	45 días	De 70 a 75 días
Revuelto (Arcoiris)	Semillas de al menos seis colores, con distintas tonalidades: rosado claro, amarillo, morado berenjena oscura, lila grisáceo con manchas negras y rojo sangre.	Principalmente por el sistema de corte y cobertura (tapado).	Permite asegurar una cosecha de algunas de esas variedades, es decir, reduce el riesgo de quedar sin cosechar.	35 días	La mayoría de las variedades en 60 días.

Otras variedades nativas que se mencionaron como casi extintas al momento del estudio, fueron: *Chimbolo* (negro redondo), *Panameño* (rayado), *Guaria* (grande y morado), *Cuarenteno rojo*, *Turrialba* (vaina morada), *Nica* y *Sangre de toro*.

Varias personas investigadoras consideran que el rescate de las variedades nativas de frijol común es sumamente importante para preservar la diversidad, y hacer uso de ella en la ampliación de la base genética de los cultivares comerciales, así como la búsqueda de alternativas para los sistemas de producción actuales [26]. Entre las causas de la pérdida de frijoles nativos están la

industrialización de la agricultura, el uso exclusivo de germoplasma mejorado, la intensificación de los monocultivos, la concentración de la tierra, la inequidad económica, la destrucción de culturas, la sobreexplotación de suelos y del agua, la contaminación con agroquímicos, y la modificación de procesos ecológicos [12] [19].

Otras investigaciones han informado que la pérdida de los frijoles nativos se debe, entre otros factores, a la sustitución de poblaciones nativas por variedades mejoradas, a fenómenos meteorológicos, a cambios en los sistemas de producción y uso de la tierra, y el abandono de las tierras o de la actividad agrícola [27] [32]. Para la conservación de la agrobiodiversidad se requiere de su uso y manejo, pues si se deja de cultivar una especie, ella desaparece de los platillos locales, pero si se abandona su consumo, también desaparece su cultivo al no existir demanda [19].

Es interesante la existencia de la variedad *Revuelto*, que consiste en una mezcla de al menos cinco tipos diferentes de semillas, de colores amarillo, morado, beige, rojo y combinado [29]. En México, a este tipo de variedades, que son mezclas de tipos y colores de semilla, se les conoce como “ensaladillas” y se les considera ventajosas para los agricultores, pues aportan mayor seguridad ante los riesgos climáticos: “si no se da una, se da la otra” [24]. Otros autores habían informado en México que los productores de frijol presentan un conocimiento detallado de sus variedades nativas [22]; lo mismo se encontró en Matambú.

Se debe resaltar la gran capacidad de adaptación que estos frijoles nativos han desarrollado a las condiciones de la zona: altas temperaturas, deficiencia nutricional de los suelos, plagas y enfermedades, y el cambio climático. Todos estos aspectos generan una mayor preferencia de los productores por las variedades nativas, que demandan poca inversión y aportan, en buena medida, a la dieta familiar.

Al igual que lo hallado en el presente trabajo, otros estudios muestran que las variedades nativas de frijol son producto de la conservación *in situ* realizada por las familias agricultoras en comunidades que las han preservado por 30 años o más. Todo este conocimiento cultural local que se transmite de generación en generación, ha derivado en el beneficio de la práctica de la siembra y en la mejora del grano, en criterios como la selección y conservación de semillas para la siguiente siembra [27] [19]. Las familias agricultoras tradicionales, con el cultivo de variedades nativas, sostienen la producción para satisfacer sus necesidades alimentarias y económicas, son guardianes de la biodiversidad, y con sus prácticas reducen los efectos del cambio climático [19].

La importante diversidad de frijoles nativos hallada en Matambú se puede deber a la evolución bajo domesticación a lo largo de muchos años, al proceso de selección de semilla llevada a cabo por los agricultores, a partir de la variación producida por cruzamientos aleatorios y promovidos por la variación ecológica de diversas microrregiones de la zona; también por la movilización e intercambio de semilla en los mercados regionales [24]. Se considera que la diversidad de frijoles nativos hallada en Matambú es alta. Es una comunidad pequeña, en la que se identificaron al menos ocho variedades principales, y la presencia de al menos cuatro más, utilizadas por 45 familias agricultoras consultadas. Este es un indicio de la importancia de la diversidad genética propia de las familias agricultoras de la zona y de la conservación *in situ* de estas semillas (germoplasma), que siguen utilizando año tras año y forma parte de su patrimonio familiar y comunitario, tal y como lo documentan otros autores [22].

Las variedades nativas de frijol son susceptibles de erosión genética por factores como el cambio en los hábitos de consumo, en los roles familiares, y el condicionamiento de los grandes mercados, por lo que toma mayor importancia al reconocer que dichas variedades son

fundamentales para la seguridad y la soberanía alimentaria, en tiempos de cambio climático, dado que resultan de un largo proceso de adaptación e interacción de factores ecológicos y culturales dentro de una comunidad y territorio [20] [13] [19].

Selección y conservación de la semilla

Las personas agricultoras prefirieron las variedades de color rojo, debido a sus características agronómicas de resistencia a plagas, alta productividad, adaptabilidad y mejor sabor; estos mismos factores habían sido mencionados por otros investigadores, quienes también observaron que un tercio de las personas encuestadas en las comunidades mapuches en Chile destacaron la adaptación al clima y el rendimiento de las variedades [12], y en Colombia, otros autores destacaron el sabor, el color de la tinta y la productividad [19].

En Matambú, las familias mencionaron que seleccionan las mejores semillas de frijol, las más sanas y robustas, y las almacenan aproximadamente durante ocho meses, de manera hermética, en tarros plásticos con tapa. Esta práctica contrasta con lo informado en Venezuela, en una colecta en el 2002, donde los frijoles nativos se guardaban en recipientes de vidrio o de lata [21]; de igual manera, se ha informado que los agricultores de ese mismo país aplicaban kerosene (canfín) a la semilla para conservarla, y que anteriormente se guardaba en arena seca [21].

Algunos agricultores conservaron la semilla junto con los rastrojos (ramas, hojas, palitos), y con cabezas de ajo, como una manera de protegerla del ataque de gorgojos; mientras que otros productores la almacenaron en costales (sacos), que fueron dejados en lugares aireados retirados del suelo. Es interesante observar cómo esta comunidad utilizaba mayoritariamente métodos naturales de conservación de la semilla de frijol, como la ceniza y la cal, así como el orégano bien seco, asoleado y molido. Otros autores también registraron el uso de cal o ceniza para el combate de plagas en la semilla almacenada de frijol [22] [31] [19]. Sin embargo, en Matambú también se observó el uso de productos químicos, como el Vitavax y el Malatión, en los procesos de conservación de la semilla de frijol nativo.

Usos socioculturales

Como lo mencionan otros autores, los frijoles han sido usados en nuestra región de manera histórica en desayunos, almuerzos o cenas [13]. En Matambú, el consumo del frijol es importante en la dieta de las familias de la comunidad. Algunas de ellas, durante la segunda siembra del año, utilizan todo el terreno disponible para plantar únicamente frijol. Durante el tiempo del estudio, en las visitas a las casas, se observó que este producto se cocinaba en la hornilla (fogón que utiliza leña como combustible, usualmente instalado al exterior de la casa, con techo), con sal y algunos condimentos, para acompañar el almuerzo; de igual forma se consumía molido en tamales o empanadas, y en sopas. Se solía cocinar una olla de frijoles cada tres días (uso frecuente).

Las variedades *Sesenteno* y *Vaina blanca* se usaban diariamente en el almuerzo. Las familias mencionaron utilizar las otras variedades, una vez que el *Sesenteno* se había agotado. El frijol *Sesenteno rojo* se preparaba majado con arroz blanco, en sopa, en caldo con arroz y en *gallo pinto*. El frijol *Turrialba* se utilizaba habitualmente para la elaboración de *gallo pinto* (preparación que mezcla arroz y frijoles y otros condimentos), en *sopa negra* con huevos y para rellenar tamales; también lo preparaban majado con cebolla para hacer empanadas de frijol con maíz. El frijol *Mantequilla* se consumía cocinado con cerdo, o solo; es una variedad de fácil cocción, pero poco utilizada por las mujeres; también lo preparan majado con arroz blanco o en sopita espesa con patas de cerdo, y generalmente no se utilizaba para elaborar el *gallo pinto*. El frijol *Brunca* se usaba mayoritariamente para la comercialización.

Algunas familias mencionaron que alimentaban las gallinas con maíz, y cuando se podía con concentrado, pero también utilizaban el frijol *Blancares* (otra variedad nativa) para alimentarlas. Adicionalmente, en la época de cosecha, algunas familias también cortaban vainicas para pelar “a la uña”, y consumir los frijoles tiernos.

El frijol es un producto históricamente utilizado en la dieta y las costumbres de las familias del territorio de Matambú; este grano constituye una importante fuente de alimentación, y cada año se destina un porcentaje de la producción para el autoconsumo, lo que les permite tener cierto grado de seguridad alimentaria. Los pueblos indígenas, desde tiempos precolombinos, tuvieron la capacidad de domesticar y más tarde desarrollar variedades capaces de adaptarse a condiciones específicas de cultivo, cuya relevancia actual llega incluso a trascender vínculos culturales y tradicionales de producción y de consumo [35]. La producción en los agroecosistemas tradicionales se basa fundamentalmente en el uso de poblaciones nativas, que se caracterizan por presentar una amplia variedad de morfotipos de semillas, tolerancia a enfermedades y plagas, adaptación a condiciones edáficas y culturales específicas, y a formas tradicionales de producción; y por tener un alto valor regional y local dado que satisfacen requerimientos específicos [27]. El frijol también representa un ingreso económico para las familias, y además constituye una herencia cultural; los frijoles nativos provienen de generaciones familiares anteriores, y traen consigo prácticas agrícolas tradicionales y hábitos culinarios [13].

Relevo generacional

Se observó una notable pérdida de las tradiciones agrícolas y culinarias vinculadas al cultivo de frijol en las nuevas generaciones. Los y las jóvenes del territorio conocen los usos y las prácticas asociadas a estos productos, pero no necesariamente las reproducen. Esto se relaciona con diversos factores: por una parte, existe la idea, sobre todo en la población joven, de derrumbar todas aquellas tradiciones que los y las acercan a un pasado indígena en el que prevalece una visión cultural regional, en donde ser indígena es sinónimo de pobreza y de marginación. Dichas visiones se hacían evidentes en lugares externos al territorio, como colegios y otros espacios sociales en los que se desarrolla su cotidianidad.

Por otra parte, las personas entrevistadas expresaron la relación que hay entre la pérdida del trabajo agrícola y la falta de oportunidades dentro del territorio, como otra de sus causas. La mayoría de las personas jóvenes debían salir de la comunidad para estudiar e insertarse en el mercado laboral; la población adulta, por lo general, trabajaba en peonazgo agrícola, aunque también en el sector de servicios y la construcción. Estos factores, al igual que las dinámicas económicas, sociales y de acceso a bienes presentes en el entorno, desplazaban el valor de la tradición agrícola por el desarrollo de estrategias productivas más apegadas a las demandas del mercado global y que hacían posible un mayor acceso a bienes de consumo. También había familias dentro del territorio que simplemente no contaban con tierra para cultivar.

Además, se presentaba una significativa pérdida de tierra cultivable, porque algunas familias las vendieron a muy bajo precio, proceso iniciado en décadas anteriores, debido a un desconocimiento de su valor, pese a ser un territorio indígena. Otras personas agricultoras también mencionaron que el suelo de sus parcelas ya se había agotado. Este es un factor común en diversas localidades: los costos de producción agrícola aumentan, y hay dependencia de los insumos químicos para fertilizar sus cultivos y lograr un mayor rendimiento [13]. Algunas estrategias comentadas en el territorio fueron recurrir al alquiler de tierras que habían tenido extensos períodos de descanso para intentar conseguir cosechas más abundantes, y pagar a las personas propietarias de los terrenos con parte de la cosecha o con trabajo.

Otra limitante y amenaza a la soberanía alimentaria de este pueblo es la falta de estímulo para propiciar el relevo generacional en la producción agrícola. Las familias que poseían más tierra y que pudieron brindar mayores niveles educativos a sus hijos e hijas, reconocieron no tener en su familia quién continuara sembrando, debido a que sus descendientes se dedicaron a otras actividades productivas que se pagan y reconocen de mejor manera.

En síntesis, se reconoce en nuestro estudio que en el territorio de Matambú todos estos cambios y limitantes han tenido consecuencias en la reproducción cultural asociada a la producción agrícola, y por ende del cultivo del frijol, a partir de condiciones que no permiten el estímulo, el reconocimiento y la generación de un trabajo digno remunerado para las nuevas generaciones. Al respecto, la pérdida de conocimiento tradicional y la disminución de poblaciones rurales comprometidas con la agricultura y la conservación de los recursos naturales, tendrán consecuencias negativas para la agrobiodiversidad y la memoria biocultural [19].

Tenencia de la tierra y economía

El problema de la tierra es una constante en el devenir histórico de los pueblos indígenas y sus sistemas agroalimentarios. La presión generada sobre sus territorios se contuvo un poco a partir de 1956, con el surgimiento de las primeras reservas indígenas [36], y en el caso de Matambú, este proceso se dio hasta 1976, período en el que se gestionó la creación del territorio como reserva indígena, justo en medio de la expansión agrícola de familias que se asentaban en Hojancha, Guanacaste. En el período 2012-2014, y también aún en los años más recientes, un porcentaje alto de las tierras indígenas pertenecen a pobladores externos, no nacidos en el territorio y considerados no indígenas [2].

En este territorio, algunas familias, al contar con mayores cantidades de tierra, lograban sembrar tanto para el autoconsumo como para comercializar los excedentes, dentro y fuera del territorio. Las familias que carecían de tierra para la siembra, se veían en la obligación de comprar los granos básicos y buscaban hacerlo entre los productores cercanos. Por su parte, la comercialización hacia afuera se realizaba mediante la venta directa del grano a pequeñas redes de distribución, como supermercados de baja escala o compradores habituales.

La falta de tierra propia para la siembra del frijol y del maíz, ambos alimentos que forman parte de un sistema agroalimentario mesoamericano, se convierten en una importante limitante. Casi la mitad de las familias entrevistadas carecían de tierra para sembrar, y se veían obligadas a alquilarla en los momentos de la siembra. Sin embargo, dependiendo de la relación existente entre la familia productora y la familia dueña de la tierra, a veces el pago del alquiler se cambiaba por grano (un porcentaje de la producción) o por trabajo (unos días de jornal). Esta dinámica del intercambio se practicaba también en las relaciones cotidianas de los productores que, por diversas circunstancias, perdían la semilla.

Se ha indicado que el abandono de las actividades agrícolas se relaciona con la falta de recursos económicos para cubrir los costos de producción, la incertidumbre climática, y la inestabilidad de los precios de los productos agrícolas, así como políticas agrarias que privilegian a la agricultura comercial y ponen a los campesinos en situación vulnerable, que los obliga a abandonar sus actividades y migrar a las ciudades u otros países [13]. Estos cambios socioeconómicos y culturales, ocurridos en las zonas en que se cultivan los frijoles nativos, ponen en riesgo de pérdida estos materiales genéticos y sus agroecosistemas de producción asociados [27].

Las transformaciones que han vivido los pobladores de Matambú en sus procesos productivos están relacionadas con los aspectos mencionados anteriormente, así como con la distribución de las tierras cultivables entre las nuevas generaciones de las familias, generando una pérdida gradual de tierras. A su vez, los cambios climáticos han obligado a las familias productoras a

correr las fechas de siembra para lograr desarrollar su ciclo de producción completo, debido a que el verano es cada vez más amplio. De hecho, la primera fecha para la siembra se ha movido a los meses de junio o julio, y las familias productoras, dependiendo de las condiciones del clima, han llegado a recoger cosecha solo una vez al año. Las personas agricultoras que se apegan a los tiempos tradicionales de la siembra, han perdido cosechas enteras, principalmente en la primera siembra, por falta de lluvias.

Un factor del contexto regional y nacional de la reducción de la producción agrícola de granos, fue la eliminación de las redes para la comercialización interna, como la que estaba a cargo del Consejo Nacional de Producción (CNP). Este ente garantizaba la comercialización de los granos básicos, y debido a las políticas de ajuste estructural (conocidos como "PAES"), impuestas por los gobiernos en la década de 1980, se desestabilizó hasta retirarse de las zonas rurales [37].

En este sentido, resulta necesario indicar que, dentro de la gestión de los gobiernos de las últimas décadas, existe una tendencia vinculada con la incorporación a los procesos propios de la liberación de la economía, la privatización de la empresa estatal, y la reducción de apoyos económicos y estímulos sociales. Esta dirección de las políticas económicas privilegió al sector agrícola que se insertó con las condiciones del libre mercado desde finales de 1980 para generar empresas agroexportadoras medianamente competitivas, aspecto que derivó en la reducción paulatina del campesinado tradicional y dio pie a la figura cada vez más fuerte del peonazgo agrícola [38]. Ahora bien, este contexto político afectaba la dinámica productiva de las familias del territorio de Matambú en el período 2012-2024, y también en los años posteriores a los del estudio, cuya forma de vida y vocación agrícola cuenta con lógicas de reproducción y producción distintas al libre mercado. Persiste la producción agrícola tradicional a baja escala, sin un apoyo sistemático de un proyecto social-agrícola por parte del Estado, pero también algunos de los miembros de la comunidad se han ido desplazando hacia una economía familiar basada en el peonazgo agrícola, principalmente en monocultivos como las meloneras, o en el sector de la construcción.

Una posibilidad explicativa sobre estas dinámicas es que las políticas públicas de apoyo educativo y técnico agrícola en las comunidades rurales no estuvieron enfocadas en la producción autónoma local, sino en la preparación para el trabajo en otros sectores productivos, de allí que se puedan observar situaciones de desarraigo o desvinculación de estas prácticas, y limitaciones para el relevo generacional.

Por último, entre las limitaciones metodológicas de este estudio están su carácter cualitativo, y el hecho de que no se entrevistó a la totalidad de la población del Territorio Indígena de Matambú.

Conclusiones

Para las familias del territorio indígena de Matambú, el frijol ha sido un importante alimento vinculado a sus dinámicas campesinas, a partir de su arraigo a la herencia indígena mesoamericana y la gastronomía asociada a ella, además de su alto valor nutricional, por lo que dicho cultivo constituye parte de su seguridad y soberanía alimentaria y nutricional.

El cambio climático, asociado a cambios en los patrones de lluvia, abre un desafío importante para la producción de frijoles nativos en Matambú, y se constituye en una amenaza debido a un menor uso de estas variedades.

Los cambios en el uso del suelo y en los patrones de asentamiento, limitan el acceso a tierra apta para cultivo en Matambú. Asimismo, el proceso de globalización ha incidido en los patrones de consumo de la población en el territorio indígena, lo que ha llevado a las familias a desestimar el consumo tradicional de frijol por productos más procesados y de fácil preparación.

La conservación de los frijoles nativos está en riesgo en el territorio indígena de Matambú, debido a cambios en los patrones de desarrollo socioeconómico regionales y nacionales, así como a factores sociodemográficos, dado que la mayoría de los productores que conservan las variedades nativas de frijol son personas adultas mayores, por lo que tanto sus semillas como sus conocimientos están en riesgo de desaparecer.

Entre los principales desafíos para la comunidad indígena de Matambú están el potenciar la participación de las nuevas generaciones en las dinámicas económicas del territorio, así como la incorporación de la tecnología, de las redes de intercambio de semillas, del comercio electrónico y del comercio justo, así como dar un mayor valor agregado a los productos e incursionar en nuevos nichos de mercado.

Este trabajo constituye un aporte importante al conocimiento de las prácticas agrícolas tradicionales de la cultura indígena chorotega asociadas al cultivo del frijol, que son parte del patrimonio cultural costarricense.

Agradecimientos

Las personas autoras agradecen a la comunidad de Matambú su acogida, el compartir sus conocimientos y prácticas culturales. Además, se agradece el financiamiento recibido por parte de CSUCA/PRESANCA II y de los fondos institucionales de la Universidad de Costa Rica y de la Universidad Estatal a Distancia, para la realización de este trabajo, y la colaboración de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés.

Referencias

- [1] J. E. Monge-Pérez, V. Solano, S. Campo, P. Oreamuno, M. T. Franco, F. Richmond y C. Arguedas, «Mejoramiento de la producción de hortalizas, maíz y frijol en comunidades indígenas (Territorio Indígena de Matambú),» de *Investigaciones en Seguridad Alimentaria y Nutricional; Convenio: PRESANCAII/CSUCA*, Ciudad de Guatemala, Guatemala, Sistema Editorial Universitario Centroamericano, Consejo Superior Universitario Centroamericano, 2016, pp. 27-32.
- [2] J. E. Monge-Pérez, V. Solano, S. Campo, P. Oreamuno, M. T. Franco, F. Richmond y C. Arguedas, «Seguridad alimentaria y nutricional en Guanacaste: el caso del territorio indígena de Matambú,» de *La investigación en Guanacaste*, San José, Costa Rica, Editorial Nuevas Perspectivas, 2014, pp. 244-257.
- [3] J. A. Escalante-Estrada, M. T. Rodríguez-González y Y. I. Escalante-Estrada, «Nitrógeno, distancia entre surcos, rendimiento y productividad del agua en dos cultivares de frijol,» *Bioagro*, vol. 27, nº 2, pp. 75-82, 2015.
- [4] J. A. Ulloa, P. Rosas, J. C. Ramírez y B. E. Ulloa, «El frijol (*Phaseolus vulgaris*): su importancia nutricional y como fuente de fitoquímicos,» *Revista Fuente*, vol. 3, nº 8, pp. 5-9, 2011.
- [5] A. R. Ramírez-Pérez, R. Díaz-Ruiz, C. Jacinto-Hernández, J. A. Paredes-Sánchez y R. Garza, «Diversidad de frijoles nativos de diferentes regiones del estado de Puebla,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 3, nº 3, pp. 467-480, 2012.
- [6] S. Román, C. Ojeda-Granados y A. Panduro, «Genética y evolución de la alimentación de la población en México,» *Revista de Endocrinología y Nutrición*, vol. 21, nº 1, pp. 42-51, 2013.
- [7] J. C. Raya-Pérez, G. M. Gutiérrez-Benicio, J. G. Ramírez, J. Covarrubias-Prieto y C. L. Aguirre-Mancilla, «Caracterización de proteínas y contenido mineral de dos variedades nativas de frijol de México,» *Agronomía Mesoamericana*, vol. 25, nº 1, pp. 1-11, 2014.
- [8] R. Arismendi, «Comportamiento de cuatro variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) sometidos a dos densidades de siembra en la Estación Experimental Sapecho - Alto Beni,» *Apthapi*, vol. 4, nº 1, pp. 978-992, 2018.
- [9] A. Valencia, D. P. Yepes, E. Barrera, G. E. Echeverry, L. López, R. A. Giraldo, R. D. Gallo y Y. C. Mazo, *Semillas criollas y nativas: producción, transformación y potencialidades como semillas de identidad*, Rionegro, Antioquia, Colombia: Centro de la Innovación, la Agroindustria y la Aviación, Servicio Nacional de Aprendizaje, 2020.
- [10] M. R. Bellón, A. F. Barrientos-Priego, P. Colunga-GarcíaMarín, H. Perales, J. A. Reyes, R. Rosales y D. Zizumbo-Villarreal, «Diversidad y conservación de recursos fitogenéticos en plantas cultivadas,» de *Capital*

- natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio, México D.F., CONABIO, 2009, pp. 355-382.
- [11] O. Voysest, *Mejoramiento genético del frijol (Phaseolus vulgaris L.): legado de variedades de América Latina 1930-1999*, Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2000.
- [12] P. Möller, «Patrimonio genético. Identificación de semillas cultivadas tradicionales en comunidades indígenas Mapuche y su estado de conservación: un aporte al conocimiento de la diversidad biológica agrícola,» *Gestión Ambiental*, vol. 26, pp. 31-53, 2013.
- [13] G. I. León-Rojas, C. Rodríguez-Soto y S. Padilla-Loredo, «La conservación in situ del frijol criollo: construyendo soberanía alimentaria en el sureste del Estado de México,» *Revista CoPaLa*, vol. 5, nº 9, pp. 125-141, 2020.
- [14] E. Ibarra, *Las sociedades cacicales de Costa Rica (Siglo XVI)*, San José, Costa Rica: Editorial UCR, 2003.
- [15] T. C. Camacho, N. Maxted, M. Scholten y B. Ford-Lloyd, «Defining and identifying crop landraces,» *Plant Genetic Resources*, vol. 3, nº 3, pp. 373-384, 2006.
- [16] O. d. D. Espinobarros, «Características morfológicas, culinarias y contenido de taninos de semillas de frijol criollo (Phaseolus vulgaris L.) cultivado en comunidades de la Región Montaña de Guerrero,» Postgrado en Desarrollo Sostenible de Zonas Indígenas, Campus Puebla, Colegio de Postgraduados, Puebla, México, 2012.
- [17] J. C. Jiménez y J. A. Acosta, «Caracterización de genotipos criollos de frijol Tepari (Phaseolus acutifolius A. Gray) y común (Phaseolus vulgaris L.) bajo temporal,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 3, nº 8, pp. 1565-1577, 2012.
- [18] D. M. Sangerman-Jarquín, J. A. Acosta-Gallegos, R. Shwenstesius, M. Á. Damián y B. S. Larqué, «Consideraciones e importancia social en torno al cultivo del frijol en el centro de México,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 1, nº 3, pp. 363-380, 2010.
- [19] Y. T. Acevedo y G. P. Zuluaga, «Custodios de variedades de frijol (Phaseolus lunatus, P. coccineus, P. vulgaris) y prácticas de conservación en Antioquia, Colombia,» *Sociedad y Ambiente*, vol. 24, pp. 1-28, 2021.
- [20] M. A. Martínez, V. Evangelista, F. A. Basurto y M. Mendoza, «La etnobotánica y los recursos fitogenéticos: el caso de la Sierra Norte de Puebla,» *Revista de Geografía Agrícola*, nº 31, pp. 79-88, 2000.
- [21] M. Gutiérrez, D. M. Pérez, A. Márques, V. Segovia y C. Marín, «Prospección y recolección de materiales nativos del género Phaseolus en la zona nororiental y andina de Venezuela,» *Plant Genetic Resources Newsletter*, nº 140, pp. 32-41, 2004.
- [22] L. d. C. Lagunes-Espinoza, F. Gallardo-López, H. Becerril-Hernández y E. D. Bolaños-Aguilar, «Diversidad cultivada y sistema de manejo de Phaseolus vulgaris y Vigna unguiculata en la región de la Chontalpa, Tabasco,» *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 14, nº 1, pp. 13-21, 2008.
- [23] E. E. Muñoz-Velázquez, D. Rubio-Hernández, I. Bernal-Lugo, R. Garza-García y C. Jacinto-Hernández, «Caracterización de genotipos nativos de frijol del Estado de Hidalgo, con base a calidad del grano,» *Agricultura Técnica en México*, vol. 35, nº 4, pp. 426-435, 2009.
- [24] M. Rocandio, P. Ramírez, F. Castillo, S. Miranda y J. A. Estrada, «Diversidad en características de interés agronómico de poblaciones nativas de frijol común en asociación con maíz,» de *X Simposio Internacional y V Congreso Anual de Agricultura Sostenible*, Chiapas, México, 2009.
- [25] H. G. Ramírez, J. A. Escobar y J. L. Alvarado, «Caracterización morfológica de cuatro cultivares nativos de frijol (Phaseolus vulgaris) y una variedad mejorada como factores que inciden en la preferencia en agricultores de Cabañas y San Vicente,» Departamento de Ciencias Agronómicas, Facultad Multidisciplinaria Paracentral, Universidad de El Salvador, San Vicente, El Salvador, 2010.
- [26] M. Gutiérrez y C. A. Rincón, «Caracterización de la variabilidad genética mediante el uso de marcadores RAPDs, de un grupo de genotipos nativos y comerciales de caraota en Venezuela,» *Agronomía Tropical*, vol. 61, nº 1, pp. 73-83, 2011.
- [27] E. N. Espinosa-Pérez, P. Ramírez-Vallejo, M. M. Crosby-Galván, J. A. Estrada-Gómez, B. Lucas-Florentino y J. L. Chávez-Servia, «Clasificación de poblaciones nativas de frijol común del centro-sur de México por morfología de semilla,» *Revista Fitotecnia Mexicana*, vol. 29, nº 1, pp. 29-38, 2015.
- [28] J. E. Monge-Pérez, P. Oreamuno-Fonseca y M. Loría-Coto, «Efecto de densidad de siembra en la producción de frijoles nativos,» *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 19, nº 2, pp. 15-23, 2023.
- [29] P. Oreamuno-Fonseca, J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Caracterización morfológica de las semillas de frijoles nativos de Guanacaste, Costa Rica,» *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 15, nº 2, p. e4690, 2023.
- [30] J. C. Jiménez y J. A. Acosta, «Efecto y correlación de fechas de siembra, fertilización y densidad en el rendimiento de frijol Pinto Saltillo de temporal en Chihuahua,» *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 4, nº 1, pp. 115-127, 2013.

- [31] E. M. Ku, «*La diversidad de frijol, maíz y calabaza en la milpa maya de Xoy, Peto, Yucatán,*» Posgrado en Ciencias Biológicas, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., Mérida, Yucatán, México, 2019.
- [32] M. E. Enríquez, X. A. Castro, S. A. López y O. G. Martínez, «*La agricultura tradicional, seguridad alimentaria y resiliencia al cambio climático por las comunidades queqch'ies en el corredor del bosque nuboso, Baja Verapaz, Guatemala,*» Programa Universitario de Investigación de estudios para la paz, Dirección General de Investigación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 2017.
- [33] R. Araya y W. González, «*La historia y futuro del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) tapado en Costa Rica,*» de *Tapado, los sistemas de siembra con cobertura*, CIIFAD Cornell University - CATIE, 1994.
- [34] H. D. Thurston, «*Sistemas de corte y cobertura: los olvidados agroecosistemas sostenibles del trópico,*» de *Tapado, los sistemas de siembra con cobertura*, CIIFAD Cornell University - CATIE, 1994.
- [35] E. Reyes, L. E. Padilla, O. Pérez y P. López, «*Historia, naturaleza y cualidades alimentarias del frijol,*» *Investigación Científica*, vol. 4, nº 3, pp. 1-21, 2008.
- [36] J. Gutiérrez y C. Moya, «*Pueblos indígenas y Estado Costarricense: disputa de derechos y control territorial,*» *Revista Rupturas*, vol. 8, nº 2, pp. 169-192, 2018.
- [37] J. M. Villasuso, *Reformas estructurales y política económica en Costa Rica*, CEPAL, 2000.
- [38] J. Mora, «*Política agraria y desarrollo rural en Costa Rica: elementos para su definición en el nuevo entorno internacional,*» *Agronomía Costarricense*, vol. 29, nº 1, pp. 101-133, 2005.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

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

Ransomware en Costa Rica: Lecciones aprendidas en instituciones públicas desde la ingeniería de sistemas

Ransomware in Costa Rica: Lessons Learned in Public Institutions from a Systems Engineering Perspective

Andy Alberto Carrillo-Espinoza¹



Fecha de recepción: 2 de agosto, 2025

Fecha de aprobación: 18 de noviembre, 2025

Carrillo-Espinoza, A.A. Ransomware en costa rica: lecciones aprendidas en instituciones públicas desde la ingeniería de sistemas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 2. Abril-Junio, 2026. Pág. 140-146.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i2.8130>



¹ Consultor especialista en ciberseguridad. Co-fundador LAND4. Costa Rica.
 andy.carrillo@land4.cr
 <https://orcid.org/0009-0001-6772-4420>

Palabras clave

Ransomware; ciberseguridad; instituciones públicas; ingeniería de sistemas; Costa Rica; Zero Trust; MITRE ATT&CK.

Resumen

El ransomware es un software malicioso que cifra los archivos del sistema afectado y exige un pago por su liberación [1]. Su evolución ha pasado de familias aisladas como CryptoLocker a complejos modelos Ransomware-as-a-Service (RaaS), que extienden el delito mediante la venta o alquiler de kits listos para atacar [2], [3]. Costa Rica ha sido uno de los países latinoamericanos más golpeados: entre 2019 y 2024 varias instituciones públicas —incluida la Caja Costarricense de Seguro Social— sufrieron brechas críticas que derivaron en la declaración de emergencia nacional por ciberataques [4], mientras los registros del CSIRT-CR muestran una tendencia ascendente de incidentes en el mismo periodo [5]. Las pérdidas económicas asociadas a la campaña del grupo Conti en 2022 superaron los USD 125 millones e impactaron directamente en la continuidad de servicios esenciales [6]. Este artículo analiza las tácticas, técnicas y procedimientos observados en los principales incidentes costarricenses, mapeándolos al marco MITRE ATT&CK; identifica vulnerabilidades comunes en infraestructura, gobierno de TI y resiliencia organizacional; y propone un marco de defensa integral que combina controles de ISO/IEC 27001, el NIST Cybersecurity Framework y principios Zero Trust. Las lecciones aprendidas evidencian la necesidad de segmentación de red, autenticación multifactor, planes de respuesta y copias de seguridad inmutables como pilares para fortalecer la ciberresiliencia institucional.

Keywords

Ransomware; cybersecurity; public institutions; systems engineering; Costa Rica; Zero Trust; MITRE ATT&CK.

Abstract

Ransomware is malicious software that encrypts system files and demands payment for the decryption key [1]. Its trajectory has shifted from isolated strains such as CryptoLocker to a fully fledged Ransomware-as-a-Service (RaaS) economy on the darknet, where attack kits are rented to affiliates [2], [3]. Costa Rica stands out as one of the most affected Latin-American countries: successive campaigns between 2019 and 2024 forced the government to declare a national emergency, disrupting public health, finance and customs services [4]. National incident data published by CSIRT-CR confirm a steady rise in reported ransomware events over the same period [5], while losses attributed to the 2022 Conti campaign alone exceeded USD 125 million [6]. This study analyses the tactics, techniques and procedures employed in these attacks, mapping them to the MITRE ATT&CK knowledge base and correlating them with known vulnerability profiles. On this basis, it proposes an integrated defence framework that blends ISO/IEC 27001 controls, the NIST Cybersecurity Framework and Zero-Trust principles, emphasising network segmentation, multifactor authentication, immutable backups and rehearsed incident-response playbooks. The lessons extracted aim to guide public institutions in Latin America toward enhanced cyber-resilience and faster recovery when confronted with modern ransomware threats.

Introducción

El ransomware es un tipo de software malicioso que cifra los archivos del sistema comprometido y exige un pago a cambio de la clave de descifrado, afectando la disponibilidad y la confidencialidad de la información [1].

En la última década, la amenaza ha evolucionado de campañas aisladas —por ejemplo CryptoLocker en 2013— a un modelo de negocio industrializado conocido como Ransomware-as-a-Service (RaaS), donde los desarrolladores alquilan su código y soporte a afiliados que ejecutan los ataques [2]. Este ecosistema ilícito reproduce la lógica de los servicios legítimos en la nube, con paneles de control, reparto de beneficios y actualizaciones continuas que facilitan la escalabilidad del delito [3].

Costa Rica experimentó el impacto más severo de esta tendencia en 2022, cuando la campaña del grupo Conti interrumpió servicios públicos esenciales y las pérdidas económicas directas superaron los USD 125 millones, según estimaciones independientes [6]. Este episodio visibilizó la vulnerabilidad de la infraestructura estatal y la necesidad de fortalecer la ciberresiliencia institucional.

De acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la ciberseguridad comprende el conjunto de herramientas, políticas y prácticas destinadas a proteger el entorno digital y los activos de información ante amenazas, vulnerabilidades e incidentes maliciosos [7]. Bajo esta premisa, las instituciones públicas deben adoptar marcos de referencia y controles que permitan prevenir, detectar y responder oportunamente a los ataques de ransomware.

En este marco, el presente artículo analiza los principales incidentes de ransomware que afectaron al sector público costarricense entre 2019 y 2024, mapea las tácticas, técnicas y procedimientos (TTP) observados al marco MITRE ATT&CK y propone un marco de defensa integral basado en los controles de ISO/IEC 27001, el NIST Cybersecurity Framework y principios de Zero Trust. Las lecciones aprendidas pretenden orientar a las entidades públicas de América Latina hacia una mejor prevención, detección y respuesta frente a esta amenaza creciente.

Materiales y métodos

Diseño de investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de alcance descriptivo-analítico, fundamentado en el análisis documental y forense de fuentes abiertas (OSINT). La metodología se estructuró para identificar, categorizar y correlacionar los vectores de ataque con los fallos de control en la infraestructura crítica nacional.

Selección de la muestra

Se aplicó un muestreo no probabilístico intencional para seleccionar los casos de estudio. Los incidentes analizados corresponden a la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). La selección se basó en tres criterios de inclusión: (1) incidentes ocurridos en el periodo 2019-2024, (2) afectación confirmada a la continuidad de servicios esenciales, y (3) disponibilidad de información técnica suficiente para la reconstrucción de la cadena de ataque.

Fuentes de información

La recolección de datos se realizó mediante la triangulación de fuentes primarias y secundarias:

- Fuentes oficiales: Se examinaron los portales del CSIRT-CR [8], el Reporte anual de incidentes 2023 del CSIRT-CR [5], así como la normativa nacional vigente sobre ciberataques [9] y los lineamientos de la Estrategia Nacional de Ciberseguridad 2023-2027.
- Estándares y reportes globales: El marco de referencia incluyó la norma ISO/IEC 27032:2023 [10] para la gestión de ciberseguridad, la base de datos de vulnerabilidades CVE Details [12] y el Crypto-Crime Report 2024 de Chainalysis [13] para contextualizar el entorno de amenazas global.

Procedimiento de análisis

El procesamiento de la información se sistematizó en dos fases:

1. Mapeo de Tácticas y Técnicas: Para cada caso, se reconstruyó el flujo del incidente identificando los puntos de entrada, movimiento lateral e impacto. Estos hallazgos se normalizaron utilizando la matriz de conocimiento MITRE ATT&CK [11], permitiendo una comparación estandarizada de los vectores de ataque. Se incorporaron estudios recientes sobre la aplicación de ATT&CK en entornos corporativos [14] para validar la clasificación.
2. Evaluación de Madurez y Contexto: Se contrastó la respuesta institucional contra los niveles de madurez digital del sector público [15]. Finalmente, para enriquecer la discusión más allá de los aspectos técnicos, se integró una perspectiva sobre la cultura de ciberseguridad académica [16] y el rol emergente de la inteligencia artificial en la formación de talento en TI [17], elementos clave para proponer soluciones sostenibles.

Resultados

El análisis forense comparativo de los incidentes en la CCSS, el MOPT y RECOPE permitió identificar patrones técnicos recurrentes en la cadena de ataque (Cyber Kill Chain). A continuación, se detallan los hallazgos categorizados por vector de compromiso y estado de los controles.

Vectores de acceso y movimiento lateral

Los datos evidencian que el compromiso inicial no dependió de vulnerabilidades de día cero (zero-day), sino de fallos en la higiene de seguridad básica. En el 100% de los casos analizados donde hubo divulgación técnica, el acceso inicial se logró mediante la explotación de servicios de escritorio remoto (RDP) expuestos a internet sin restricciones geográficas o a través de campañas de phishing dirigidas a credenciales administrativas.

Una vez dentro de la red, la ausencia de segmentación (arquitectura plana) y la falta de Autenticación Multifactor (MFA) fueron los factores determinantes que facilitaron la escalada de privilegios y el movimiento lateral sin detección, reproduciendo el escenario crítico que motivó la declaración de emergencia nacional en 2022 [4].

Impacto operativo y económico

A nivel de resiliencia, se constató que ninguna de las entidades contaba con respaldos inmutables o desconectados (air-gapped) en el momento del ataque. Esta carencia operativa provocó el cifrado de los sistemas de recuperación, prolongando la interrupción de servicios y elevando los costos de remediación. Específicamente, se estima que las pérdidas directas asociadas a la campaña del grupo Conti superaron los USD 125 millones, afectando a más de 30 000 estaciones de trabajo del sector público [6].

Esta tendencia de vulnerabilidad se ve corroborada por los registros del CSIRT-CR, que reportan un incremento sostenido del 38% en los incidentes de ransomware atendidos entre los años 2019 y 2024 [5].

Cuadro 1. Vulnerabilidades comunes identificadas en los ataques analizados.

Institución	Acceso inicial	Segmentación de red	MFA	Backups	Plan de respuesta
CCSS	RDP/ Hive	No	No	No	No
MOPT	Phishing	No	Parcial	Parcial	Parcial
RECOPE	No divulgado	No	Parcial	Parcial	Parcial

El Cuadro 1 sintetiza la postura de seguridad de las instituciones afectadas, evidenciando una ausencia sistémica de defensa en profundidad. Los hallazgos confirman que, independientemente de la institución, la falta de controles de identidad (MFA) y de contención (segmentación) constituyó el denominador común que maximizó el impacto de los ataques.

Discusión

Los hallazgos sugieren que la crisis de ciberseguridad en Costa Rica no fue consecuencia de una sofisticación tecnológica inédita por parte de los atacantes, sino de una deuda técnica acumulada en la gobernanza de TI. Al correlacionar los incidentes con el marco MITRE ATT&CK, se observa que técnicas estándar —como el abuso de credenciales válidas y servicios remotos externos— siguen siendo altamente efectivas debido a la falta de higiene digital básica en el sector público.

Contextualización regional

Este patrón de vulnerabilidad trasciende las fronteras nacionales. Al contrastar el caso costarricense con eventos recientes en la región, se identifican paralelismos claros. Por ejemplo, el ataque de ransomware a IFX Networks en Colombia paralizó más de dos millones de procesos judiciales en 2023 [18], y el compromiso al Ministerio de Salud de Argentina expuso debilidades críticas en el control interno de datos sensibles [19].

La similitud entre estos eventos confirma que las instituciones públicas latinoamericanas comparten una superficie de ataque frágil ante el modelo de Ransomware-as-a-Service (RaaS). Esto valida la hipótesis de que la inversión tecnológica aislada es insuficiente; se requiere adoptar marcos de arquitectura Zero Trust adaptados a la realidad presupuestaria y operativa de la región, tal como sugiere la normativa técnica nacional [9].

Limitaciones del estudio

Es necesario reconocer las limitaciones en el alcance de este análisis. Principalmente, la dependencia de fuentes de información pública restringe la profundidad técnica en ciertos casos. Específicamente, la falta de divulgación de un informe forense detallado sobre el incidente en RECOPE impide confirmar con certeza las técnicas de movimiento lateral empleadas. Asimismo, las cifras de impacto económico se basan en estimaciones de terceros [6], dado que no todas las instituciones han transparentado los costos totales de recuperación.

Conclusiones y recomendaciones

El análisis de los incidentes en la CCSS, el MOPT y RECOPE permite concluir que la severidad del impacto no respondió a la sofisticación de los vectores de ataque, sino a la ausencia de controles fundamentales de ciberhigiene. La evidencia forense confirmó que la explotación de servicios remotos (RDP) y el uso de arquitecturas de red plana facilitaron el despliegue del ransomware, demostrando la ineficacia de la seguridad perimetral tradicional frente a amenazas modernas.

A partir de estos hallazgos, se determinan las siguientes prioridades técnicas:

1. Gestión de Identidad: La implementación de Autenticación Multifactor (MFA) resulta imperativa para mitigar el compromiso de credenciales, identificado como el principal vector de acceso inicial.
2. Segmentación: La transición hacia modelos Zero Trust se establece como el único mecanismo validado para contener el movimiento lateral de los adversarios dentro de la red administrativa.
3. Resiliencia: La adopción de respaldos inmutables y desconectados (estrategia 3-2-1) constituye un requisito indispensable para garantizar la recuperación operativa ante el cifrado de activos críticos.

Referencias

- [1] Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA) and Multi-State Information Sharing & Analysis Center (MS-ISAC), #StopRansomware Guide: Ransomware and Data Extortion Prevention and Response, Washington, DC, USA, Jan. 2023. [Online]. Disponible en: https://www.cisa.gov/sites/default/files/2023-01/CISA_MS-ISAC_Ransomware%20Guide_S508C.pdf (accesado Jul. 14, 2025).
- [2] H. Oz, A. Aris, A. Levi, and A. S. Uluagac, "A survey on ransomware: Evolution, taxonomy, and defense solutions," *Computers & Security*, vol. 125, Art. no. 102913, 2023. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.102913>
- [3] P. H. Meland, Y. F. F. Bayoumy, and G. Sindre, "The ransomware-as-a-service economy within the darknet," *Computers & Security*, vol. 92, Art. no. 101762, 2020. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101762>
- [4] P. M. Datta and T. Acton, "Ransomware and Costa Rica's national emergency: A defense framework and teaching case," *Journal of Information Technology Teaching Cases*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2023. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1177/20438869221149042>
- [5] Ministerio de Ciencia, Innovación, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT) – CSIRT-CR, Reporte anual de incidentes de seguridad informática 2023, San José, Costa Rica, 2023.
- [6] C. Rosch, "Un ciberataque masivo en Costa Rica aflige a la ciudadanía," *Rest of World*, Jun. 2, 2022. [Online]. Disponible en: <https://restofworld.org/2022/ciberataque-costa-rica-ciudadania> (accesado Jul. 14, 2025).
- [7] International Telecommunication Union (ITU), Recommendation X.1205: Overview of Cybersecurity, Geneva, Switzerland, 2008. [Online]. Disponible en: <https://www.itu.int/rec/T-REC-X.1205-200804-I/en> (accesado Jul. 14, 2025).
- [8] Centro Criptológico Nacional (CCN-CERT), "Creación del CSIRT-CR de Costa Rica," 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.ccn-cert.cni.es/es/component/content/article/1002-creacion-del-csirt-cr-de-costa-rica.html?catid=23&Itemid=11827> (accesado Jul. 14, 2025).
- [9] República de Costa Rica, Decreto Ejecutivo N.º 43542-MP-MICITT: Declaratoria de emergencia nacional por ciberataques, Imprenta Nacional, San José, Costa Rica, May 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.imprentanacional.go.cr> (accesado Jul. 14, 2025).
- [10] International Organization for Standardization (ISO), ISO/IEC 27032:2023 –Cybersecurity – Guidelines for Internet Security, 2nd ed., Geneva, Switzerland, 2023.
- [11] MITRE Corporation, "ATT&CK® knowledge base," 2025. [Online]. Disponible en: <https://attack.mitre.org> (accesado May 19, 2025).



- [12] CVE Details, “CVE vulnerability database,” 2025. [Online]. Disponible en: <https://www.cvedetails.com> (accesado May 19, 2025).
- [13] Chainalysis Inc., *Crypto-Crime Report 2024*, New York, NY, USA, 2024. [Online]. Disponible en: <https://www.chainalysis.com/resources/reports/2024-crypto-crime-report/> (accesado Jul. 14, 2025).
- [14] Y. Jiang, W. Zhou, C. Qian, and L. Li, “MITRE ATT&CK applications in cybersecurity and the way forward,” arXiv preprint arXiv:2502.10825, 2025. [Online]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2502.10825> (accesado Jul. 14, 2025).
- [15] Programa Sociedad de la Información y el Conocimiento (PROSIC), *Informe de labores 2022*, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, Feb. 2025. [Online]. Disponible en: https://prosic.ucr.ac.cr/sites/default/files/2025-02/informe_2022_completo.pdf (accesado Jul. 14, 2025).
- [16] M. P. Castro-López, “Conocimiento de la percepción de la ciberseguridad en los estudiantes de la Universidad de Costa Rica,” *Tecnología en Marcha*, vol. 37, no. esp. 6, pp. 5–11, 2024. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/tm.v37i6.7261>
- [17] J. F. Useda-Medrano, A. A. Ortiz-García, and F. Chávez-Baltodano, “Visión estudiantil: IA en la transformación de la enseñanza de ingeniería en TI,” *Tecnología en Marcha*, vol. 38, no. esp. 5, pp. 37–46, 2025. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/tm.v38i5.7897>
- [18] O. Griffin, “More than 50 Colombian state, private entities hit by cyber-attack– Petro,” *Reuters*, Sep. 18, 2023. [Online]. Disponible en: <https://www.reuters.com/world/americas/more-than-50-colombian-state-private-entities-hit-by-cyberattack-petro-2023-09-18/> (accesado Jul. 14, 2025).
- [19] Unidad Fiscal Especializada en Ciberdelincuencia (UFECI), “La UFECI abrió una investigación preliminar por un supuesto ataque informático al Ministerio de Salud de la Nación,” *Ministerio Público Fiscal de la Nación, Argentina*, Oct. 24, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.fiscales.gob.ar/ciberdelincuencia/la-ufeci-abrio-una-investigacion-preliminar-por-un-supuesto-ataque-informatico-al-ministerio-de-salud-de-la-nacion/> (accesado Jul. 14, 2025).

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

El autor declara el uso de las herramientas de inteligencia artificial *ChatGPT* y *Gemini* para traducir partes de este artículo del español al inglés. La herramienta nos ayudó a agilizar el proceso de traducción, pero realizamos una revisión exhaustiva para asegurar la calidad y precisión de las traducciones. Además, como apoyo para darle formato a las referencias bibliográficas.