



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Abril - Junio 2024
Volumen 37-2
ISSN-E 2215-3241



Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org UAEM

Dialnet

melica

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Desarrollo Científico

DOAJ

ET
Editorial Tecnológica
de Costa Rica

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

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

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

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

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

Ariana Sanabria García

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 37-2. Abril-Junio, 2024
– Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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

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

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

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

Publicación y directorio en catálogos

TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Evaluación de la calidad fisicoquímica en cápsulas de cefalexina 500 mg Quality evaluation of cephalexin 500 mg capsules <i>Samantha Pereira-Leiva, Esteban Pérez-López</i>	3
Micorremediación: el caso de <i>Pleurotus ostreatus</i> sobre polímeros sintéticos como el acetato de celulosa Mycoremediation: the case of <i>Pleurotus ostreatus</i> on synthetic polymers such as cellulose acetate <i>Isabel Barrantes-Jiménez, Ericka Marín-Sandí, Monica Murillo-Murillo, David Rojas-Rojas, Sergio Vallecillo-Cedeño, Sebastián Valverde-Rojas</i>	15
Evolution of DevOps: Lessons learned for success as part of digital strategy Evolución de DevOps: Lecciones aprendidas para el éxito como parte de la estrategia digital <i>Gabriel Silva-Atencio, Mauricio Umaña-Ramírez</i>	23
Huella hídrica en el proceso constructivo como indicador de sostenibilidad: un estudio de caso para Costa Rica Water footprint in the construction process as an indicator of sustainability: a case study for Costa Rica <i>Alejandro Mora-González, Nidia Cruz-Zúñiga</i>	36
Análisis Acústico del Teatro Nacional de Costa Rica a partir de sus Respuestas Impulsionales Acoustical Analysis of the National Theatre of Costa Rica by means of its Room Impulse Responses <i>Alejandro Delgado-Castro, Brayan Mauricio Méndez-Picado</i>	49
Polihidroxicanoatos (PHAs) en bacterias como alternativa ante el aumento de la contaminación ambiental: análisis metabólico y avances en la actualidad Polyhydroxyalkanoates (PHAs) in bacteria as an alternative to environmental pollution increase: metabolic analysis and current advances <i>Steven Ceciliano-Castro, Daniela Vargas-Morera, Roselind Vargas-Delgado, Melany Villanueva-Ilama, Dayana Mora-Rodríguez</i>	60

Caracterización de las tecnologías de secuenciación genética de segunda y tercera generación	
Characterization of second- and third-generation genomic sequencing technologies	
<i>Dorian Rojas-Villalta, Daniela Benavides-Villegas, Belén Angulo-Hidalgo, Luis Muñoz-Solórzano, Chiara Consumi-Tubito</i>	70
El desarrollo de plástico biodegradable a partir del cáñamo por estímulo microbiano	
The development of biodegradable plastic from hemp by microbial stimulus	
<i>Johanna Marcela Moscoso-Gama, María Camila Sanabria-Cuervo, Ana María Sanchez-Rubiano</i>	82
Hacia el mejoramiento de la gestión de activos de equipos críticos en Pymes: propuesta de metodología e implementación	
Towards the enhancement of asset management of critical equipment in SMEs: methodology and implementation proposal	
<i>Miguel Ángel Segura-Monge, Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez, Greivin Barahona-Guzmán, Juan José Montero-Jiménez</i>	95
Diseño de sistema para la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil para robótica de enjambres	
Design of a deposition system for a ferromagnetic pheromone from a mobile robot for swarm robotics	
<i>Daniel Monge-Chaves, Juan Carlos Brenes-Torres, Cindy Calderón-Arce</i>	109
Estimación del volumen pluvial captado por cubiertas usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): estudio de caso	
Estimation of rainfall volume captured by roofs using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a case study	
<i>Oscar Abel Vergara-Leyes, Daner Jesús Julian-Vargas, Andrea Villarroel-Rocabado, Javier Vicente Ruiz-Rivero, Oscar Mauricio Áviles-Jimenez, Nahúm Gamalier Cayo-Chileno</i>	121
Miel como inductor de compuestos fenolicos, flavonoides y de crecimiento de fruto de mango var. ataúlfo	
Honey as an inducer of phenolic compounds, flavonoids and growth of mango fruit var. ataúlfo	
<i>Víctor Jesús Albores-Flores, Julieta Grajales-Conesa, Grisel Pérez-Santos, Karina Janeth Pérez-Escobar, José Alfonso López-García, Claudia Ivette Albores-Flores, Marycarmen Utrilla-Vázquez</i>	134
Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica	
Design of a bridge health index for prioritization of technical interventions in Costa Rica	
<i>Giannina Ortiz-Quesada, César Garita-Rodríguez, Angel Navarro-Mora, Gerardo Paez-González, Alejandro Alfaro-Acuña</i>	144

Evaluación de la calidad fisicoquímica en cápsulas de cefalexina 500 mg

Quality evaluation of cephalexin 500 mg capsules

Samantha Pereira-Leiva¹, Esteban Pérez-López²

Fecha de recepción: 20 de junio de 2023
Fecha de aprobación: 6 de octubre de 2023

Pereira-Leiva, S; Pérez-López, E. Evaluación de la calidad fisicoquímica en cápsulas de cefalexina 500 mg . *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 3-14.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6662>

- 1 Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente - Recinto Grecia. Correo electrónico: samantha.pereira@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3739-1036>
- 2 Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente - Recinto Grecia. Correo electrónico: esteban.perezlopez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6379-7139>

Palabras claves

Cefalexina; antibiótico; pruebas de calidad; medicamentos; USP.

Resumen

El presente artículo contiene los detalles sobre el estudio realizado a la calidad fisicoquímica en las cápsulas de cefalexina de 500 mg que se comercializan en Costa Rica. La cefalexina es un antibiótico de uso frecuente que permite combatir las infecciones causadas por bacterias gramnegativas, grampositivas, y es de gran demanda debido a que presenta poca toxicidad y un amplio margen terapéutico según señalan distintos autores. El objetivo de la presente investigación fue determinar la calidad durante su vida de anaquel, de las cápsulas de cefalexina 500 mg, en cuanto a los principales parámetros fisicoquímicos evaluables. La metodología se basó en realizar un muestreo aleatorio a nivel de farmacias de la zona central del país y adquirir la cantidad de dosis (cápsulas) necesarias de un mismo lote de cada una de las marcas que fueran ubicadas en dichos comercios, para proceder a someterlas a las principales pruebas de calidad en el Laboratorio de Química del Recinto de Grecia de la Universidad de Costa Rica según lo establecido en la Farmacopea de los Estados Unidos (USP 43). Los resultados evidencian que, para la prueba de ensayo de principio activo, el contenido de cefalexina en las cinco marcas contempladas está entre 99-103% de lo etiquetado; para la prueba de disolución las cinco marcas oscilaron entre 110-117% de principio activo disuelto de la cantidad declarada en la etiqueta, y en la prueba de uniformidad por variación de peso los resultados reflejan que el valor de aceptación (AV) obtenido oscila entre 3 y 12 en las distintas marcas. En conclusión, se determinó el cumplimiento de las cinco marcas contempladas en cuanto a los criterios USP establecidos: para la prueba de potencia de principio activo 90-120% de lo etiquetado, la prueba de disolución ninguna dosis es menor al 85% (Q+5%) disuelto, y para la prueba de variación de peso el AV \leq 15.

Keywords

Cefalexin; antibiotic; quality tests; drugs; USP.

Abstract

This article contains details about the study carried out on the physicochemical quality of the 500 mg cephalexin capsules sold in Costa Rica. Cephalexin is a frequently used antibiotic that helps fight infections caused by gram-negative and gram-positive bacteria, and is in great demand because it has little toxicity and a wide therapeutic range, according to different authors. The objective of the present investigation was to determine the quality during its shelf life of cephalexin 500 mg capsules, in terms of the main evaluable physicochemical parameters. The methodology was based on conducting a random sampling at the pharmacy level in the central area of the country and acquiring the necessary number of doses (capsules) from the same batch of each of the brands that were located in said stores, to proceed to submit them to the main quality tests in the Chemistry Laboratory of the Grecia Campus of the University of Costa Rica laboratory as established in the United States Pharmacopeia (USP 43). The tests were carried out in the Chemistry Laboratory of the Grecia Campus of the University of Costa Rica. The results show that, for the active ingredient test, the cephalexin content in the five brands considered is between 99-103% of labeling; For the dissolution test, the five brands ranged between 110-117% of dissolved active ingredient of the amount declared on the label, and in the uniformity test by weight variation, the results reflect that the acceptance value (AV) obtained ranges between 3 and 12 in the different brands. In conclusion, the compliance of the

five contemplated brands was determined in terms of the established USP criteria: for the active ingredient potency test 90-120% of labeling, the dissolution test no dose is less than 85% (Q+5%) dissolved, and for the weight variation test the $AV \leq 15$.

Introducción

La cefalexina es un antibiótico utilizado en la medicina para combatir infecciones causadas por microorganismos gram positivos y gram negativos; este tipo de bacterias son agentes patógenos para la salud humana [1], por lo que es importante asegurar buenas prácticas de manufactura, por medio de análisis de control de calidad para garantizar el cumplimiento de las especificaciones establecidas para el fármaco. Cual es la referencia

Este antibiótico pertenece al grupo β -lactámicos que se encuentra dentro del grupo de las cefalosporinas, los cuales se emplean para el tratamiento de infecciones causadas por microorganismos gramnegativos y grampositivos. Específicamente, la cefalexina ayuda a combatir las infecciones causadas por gramnegativos como la *Salmonella* y *Pasteurella*, y es de gran demanda debido a que presenta poca toxicidad y un amplio margen terapéutico [1].

Según Gómez, *et al.* [2] en su estudio sobre los betalactámicos en la práctica clínica, indica que el mecanismo de acción de los β -lactámicos consiste en inhibir la formación de la pared bacteriana, provocando una interferencia en la síntesis del peptidoglicano mediante un bloqueo en la última etapa de su producción (transpeptidación), además actúa activando la autolisina bacteriana endógena que destruye el peptidoglicano, las cuales son bacterias parciales, actuando únicamente con base al crecimiento celular.

Por otra parte, en el plano experimental a nivel de laboratorio, es necesario mencionar que la técnica de espectrofotometría UV-Vis, es una de las más útiles para determinar la calidad en múltiples fármacos, cuando se demuestra que no existe interferencia por co-absorción a una misma longitud de onda de trabajo. Esta técnica analítica consiste en determinar la concentración de analitos en solución, cuyas moléculas absorben radiaciones electromagnéticas y esta energía que absorben en forma de luz está relacionada linealmente con la concentración [3].

En línea con lo anterior, como evidencia de estudios realizados con cefalexina, destaca el trabajo publicado por Chorilli, *et al.* [4], determinaron el comportamiento del activo cefalexina en diferentes marcas en Brasil, en su investigación titulada "Estudo de perfil de dissolução dos medicamentos de referência, genérico e similar contendo cefalexina na forma farmacêutica cápsula"; cuyo fin consistió en evaluar el perfil de disolución de fármacos de referencia, genéricos y similares que contienen 500 mg de cefalexina en cápsulas. Las muestras fueron sometidas a pruebas de disolución y perfiles de disolución in vitro, concluyendo que las mismas cumplen con las especificaciones y que son de rápida disolución, ya que los porcentajes de disolución fueron mayores al 85%, existiendo una gran similitud entre las curvas obtenidas para cada muestra, sugiriendo que son fármacos equivalentes.

Asimismo, Cuencas [5] en Bolivia, para su tesis de grado de licenciatura en química farmacéutica, sobre el desarrollo y validación de cefalexina comprimidos de 500 mg por espectrofotometría ultravioleta, planteó la investigación-desarrollo-validación de la metodología analítica mediante la espectrofotometría ultravioleta, la metodología empleada consistió primeramente en pruebas al espectrofotómetro como la aptitud de absorbancia, precisión y exactitud fotométrica, posteriormente pruebas de estabilidad a las muestras escogidas así como a los estándares, concluyendo que el método es óptimo, y procedió a la validación del mismo, determinando que el método tiene una buena especificidad al no encontrar diferencias significativas entre las muestras y estándares secundarios; presenta un coeficiente de correlación de 0,998 por ende

es lineal, la sensibilidad con relación a exactitud presenta un porcentaje de recuperación dentro del rango establecido, además el método es preciso después de determinarlo con estudios de repetibilidad del instrumento y una presión intermedia bajo un tiempo y espacio diferente.

De forma similar, García et al. [1] en su investigación realizada en Cuba, sobre la evaluación del desempeño del método analítico para la cuantificación de la materia prima de cefalexina, cefaclor, cefoxitina sodica y cefixina, llevó a cabo el estudio utilizando la técnica de cromatografía líquida de alta resolución en fase reversa, la preparación de estándares, muestras y los sistemas de solventes para cada compuesto corresponde a la planteado por la farmacopea oficial, a los datos obtenidos en cada ensayo se le determinó la homogeneidad de varianza para demostrar el comportamiento normal y se aplicó herramientas estadísticas como ANOVA simple, regresión lineal, y para la validación se aplicó los lineamientos establecidos por la Conferencia Internacional de Armonización (ICH). Los resultados que obtuvieron concluyeron que los métodos son lo suficientemente específicos, precisos y exactos, con una respuesta lineal en el rango de concentración de 50 a 150%.

El estudio de fármacos a diferentes marcas comerciales suele hacerse con el fin de encontrar diferencias significativas entre cada una de ellas y corroborar que cumple con los estándares de calidad, tal es el caso de Caseres y Fretes [6] en Paraguay en su investigación sobre la comparación de cefalexina 500 mg nacional e importada, cuyo objetivo de estudio fue comparar los perfiles de disolución de especialidades farmacéuticas nacionales conteniendo cefalexina 500 mg con una importada; la metodología utilizada fue la contenida en la monografía USP 37, realizaron las determinaciones con las técnicas de HPLC y espectrofotometría UV-Vis, y los resultados obtenidos fueron que todos cumplen con los límites establecidos y mostraron un comportamiento de disolución similar.

También, Alarcón y Celaguachay [7] en Ecuador, en su trabajo de campo sobre el estudio comparativo de los parámetros fisicoquímicos de cefalexina 500 mg cápsulas genéricas de dos laboratorios farmacéuticos ecuatorianos frente a medicamento innovador; el método analítico usado corresponde al oficial USP 41, cuantificando el principio activo por HPLC y espectrofotometría UV-Vis, teniendo como resultados para laboratorios G-002, G-003, frente innovador I-001 respectivamente, los siguientes: tiempo de desintegración: 2' 38"; 2' 36"; 2' 39". Valoración por HPLC: 100,22%; 98,33%, 95,66%. Ensayo de disolución 105,90%; 105,91%; 105,21%. Uniformidad de dosis por variación de peso: L1= 9,55%; L1= 8,93%; L1= 8,93%, concluyendo que los medicamentos genéricos estudiados cumplen los parámetros de control de calidad frente al innovador, según las especificaciones técnicas de la USP correspondiente y presentan mínimas variaciones entre sus análisis.

Por su parte, a nivel de Costa Rica no fue posible ubicar estudios publicados sobre calidad en cápsulas de cefalexina específicamente, pero existen investigaciones publicadas con un enfoque similar al de la investigación evidenciada en este artículo con otro tipo de fármacos. Por ejemplo, Pérez [8] en su estudio sobre el análisis comparativo de la uniformidad de contenido en tabletas de sildefanil (50 mg/tab) de un producto genérico y el medicamento original, determinó que el método empleado fue selectivo, preciso y exacto; y las tabletas ensayadas se analizaron por espectrofotometría ultravioleta visible cuyos resultados obtenidos determinan que las muestras cumplen los límites establecidos en la farmacopea estadounidense para la prueba de uniformidad de contenido.

Pérez y Rojas [9] en su estudio sobre la validación de un método para la cuantificación de acetaminofén en tabletas de 500 mg por espectrofotometría ultravioleta para la prueba de uniformidad de contenido, los parámetros estimados fueron: linealidad, exactitud, repetibilidad

y precisión intermedia utilizando como referencia la guía de validación del Ente Costarricense de Acreditación (ECA), para un método normalizado y modificado, y con los resultados obtenidos concluyen que el método es lineal, preciso y exacto.

Por su parte, Castiglioni [10], en su tesis sobre la evaluación del impacto de resultados S2 en las pruebas de disolución de fármacos multiorigen presentes en la lista de medicamentos priorizados y que deben demostrar equivalencia terapéutica *in vitro*; esta investigación se basó en evaluar si la variabilidad de los resultados de la prueba de disolución de rutina en lotes específicos de medicamentos presentes en la lista de medicamentos priorizados por el Ministerio de Salud tienen impacto en la similitud de los perfiles de disolución comparativos en la toma de decisiones, primeramente selecciono medicamentos disponibles en la CCSS, realizó una validación del sistema y método, concluyendo que ambos son precisos y exactos para desarrollar los perfiles de disolución comparativos con el producto de referencia nacional. De los tres lotes escogidos concluye que en todos los casos se cumple la equivalencia terapéutica *in vitro*, con respecto a la prueba de disolución correlacionó los valores de Q y confirma que entre mayor es el valor de Q en el lote menor será su factor de diferencia y mayor el de similitud en un perfil de disolución comparativo.

Por otra parte, Pérez et al. [11] en su estudio sobre evaluación de los parámetros de calidad en tabletas de ibuprofeno que se consumen en Costa Rica, las muestras de interés fueron adquiridas de forma aleatoria en diferentes locales comerciales, a diferentes potencias 200, 400 y 600 mg de principio activo con forma farmacéutica de tabletas, el método analítico utilizado como referencia es de la USP 39, del cual incluyeron las pruebas de valoración de principio activo por HPLC, el ensayo de disolución cuantificando por espectrofotometría UV-Vis y la uniformidad de dosis unitaria por variación de peso; los resultados que obtuvieron muestran que los productos sometidos a este estudio son seguros al encontrarse dentro de las especificaciones establecidas a nivel farmacopeico.

Por último, es importante resaltar que, la evaluación de parámetros de desempeño en toda metodología analítica, son importantes porque generan evidencia para demostrar que el método es óptimo para ser aplicado, siempre y cuando cumplan con los criterios de aceptación. En este sentido, las pruebas de verificación al método, como linealidad, repetibilidad y precisión intermedia se basan en considerar el equipo, sistema electrónico, operaciones analíticas y muestras a analizar como un sistema integral [5]. Por tal razón, es esencial garantizar la validez de los resultados de laboratorio a través de procesos rigurosos como los señalados.

Con base en lo anterior, se dimensiona la trascendencia de la investigación particular en el ámbito de la calidad de medicamentos, y además, la proyección existente hacia la sociedad costarricense al contemplar como objetivo la evaluación de la calidad de un fármaco de gran relevancia para la salud de las personas como lo es la cefalexina, realizando la adquisición del medicamento para el estudio en su plena vida de anaquel, lo cual permite una postura investigativa sin intereses particulares y prejuicios y garantiza la objetividad de los resultados.

Materiales y métodos

Se realizó la indagación a nivel de farmacias de la zona central del país para conocer cuáles son las diferentes marcas de cefalexina 500 mg cápsulas que se comercializan en el país, y de esta forma se procedió a la compra autorizada para fines investigativos, por tratarse de un medicamento de venta bajo receta médica, contemplando la adquisición de no menos de 50 cápsulas de cada marca y el mismo lote en cada caso, así como, la adquisición de las cápsulas que distribuye la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS). En el Cuadro 1, se incluye el detalle de las marcas incluidas en el estudio.

Cuadro 1. Información de las marcas comerciales de cefalexina en cápsulas de 500 mg utilizadas para la investigación.

Marca/procedencia	Lote
CCSS	A07102
La Santé	3263621
ADIUVO	15202
Biopharma	A1093
MK	SVF5342

Los parámetros evaluados fueron linealidad, por medio de tres curvas de calibración en el rango de trabajo (16 a 26 mg/L); la repetibilidad, evaluando no menos de seis réplicas de cada estándar, uno bajo, uno medio y uno alto del rango de concentraciones definidos para la curva de calibración; y la precisión intermedia, que se realizó bajo las condiciones de repetibilidad pero variando el factor tiempo, cambiando el día de análisis entre la recolección de datos correspondientes para la prueba.

Seguidamente, se procedió a la realización de las pruebas de laboratorio para determinar la calidad de los productos contemplados, para lo cual se tomó como base la metodología de la monografía oficial de la USP 43[12]; para evaluar los parámetros de calidad: ensayo de principio activo: el cual se realiza pesando y cuantificando no menos de tres muestras provenientes del contenido homogéneo de 20 cápsulas del producto; la uniformidad de dosis por variación de peso: que se realiza en primera instancia pesando individualmente el contenido de 10 cápsulas del producto y relacionando estos pesos con respecto al resultado promedio del contenido obtenido de la prueba del ensayo; y por último, la prueba de desempeño disolución con medio: agua 900 mL, aparato 1: canastas rotatorias 100 rpm, tiempo: 30 min; la cual se realiza sometiendo al proceso de disolución seis cápsulas (en primera instancia) del producto en estudio, bajo las condiciones descritas.

El equipo utilizado fue el espectrofotómetro ultravioleta-visible Jasco V-730, a 262 nm, concentración de trabajo 20 mg/L con agua destilada como disolvente, y todas las pruebas fueron ejecutadas en el Laboratorio de Química del Recinto de Grecia, de la Universidad de Costa Rica.

Resultados y discusión

Con respecto a la etapa inicial de evaluación de parámetros de desempeño, las pruebas realizadas demostraron linealidad, precisión y exactitud del método para ser empleado con confianza también para la valoración de principio activo por medio de la técnica de espectrofotometría UV-Vis, la cual está establecida oficialmente en la USP para la cuantificación de cefalexina en la prueba de disolución específicamente.

Por su parte, en relación con la valoración del principio activo en las diferentes marcas comerciales de cefalexina 500 mg/cápsula, en el Cuadro 2, es posible destacar el comportamiento homogéneo de los resultados por cada marca indagada, y los promedios obtenidos oscilando entre 99 y 103% de lo etiquetado entre las marcas analizadas, con desviaciones estándar relativas no mayores a 1,82% como la obtenida en el caso de las cápsulas de la marca ANDIUVO, la precisión de los datos con desviación estándar relativa más baja obtenida para el caso de las cápsulas de Biopharma con 0,21% de desvío relativo. Lo

anterior, considerando que en esta prueba la desviación obedece a la metodología y al trabajo del analista, y no a la variabilidad en el producto, lo cual se evalúa en la prueba de variación de peso.

Cuadro 2. Resultados de la valoración de cefalexina cápsulas en cinco productos comerciales expresado como % de lo etiquetado.

Muestra	CCSS	La Santé	ADIUVO	Biopharma	MK
1	102.71	98.35	97.07	100.95	100.23
2	100.78	100.10	99.82	101.35	100.88
3	104.11	99.87	100.46	101.24	100.80
Promedio	102.53	99.44	99.12	101.18	100.64
DSR (%)	1.63	0.95	1.82	0.21	0.35

Al evaluar la calidad de los distintos productos comerciales de cefalexina 500 mg/cápsulas, fue posible dimensionar que los resultados reflejan que todas las marcas contempladas en el estudio cumplen con el criterio de aceptación farmacopeico para la prueba de valoración de principio activo, el cual establece que el contenido de cefalexina, en términos de porcentaje de lo etiquetado, debe estar entre 90-120% de potencia del analito [12], lo cual se cumple en todos los casos evaluados con promedios por encima del 99% y por debajo del 103% en todas las marcas (ver Figura 1).

En relación con lo anterior, Rodríguez [13] menciona que el principio activo de un medicamento es la parte esencial de cualquier presentación farmacéutica, la sustancia responsable del efecto farmacológico de un medicamento. Por lo cual, es primordial y obligatorio asegurar que el componente principal del fármaco esté presente en la formulación en el ámbito porcentual que establece la farmacopea oficial, para garantizar el efecto esperado del fármaco al ser suministrado.

Es importante, considerar en la parte de manufactura que los medicamentos siempre oscilen su potencia alrededor del 100% o más de lo etiquetado, y no cercano al límite inferior de la especificación. Si bien para esto existen los estudios de estabilidad, los cuales se basan en evidenciar la capacidad que tiene un medicamento de mantener por un determinado tiempo las características fisicoquímicas originales dentro de las especificaciones [14]; si los fármacos salen a la venta con una potencia cercana al límite inferior de la especificación, podría presentarse que el principio activo llegue a bajar ese porcentaje de lo etiquetado y llegar a no cumplir con su principal función activa dentro de su vida de anaquel.

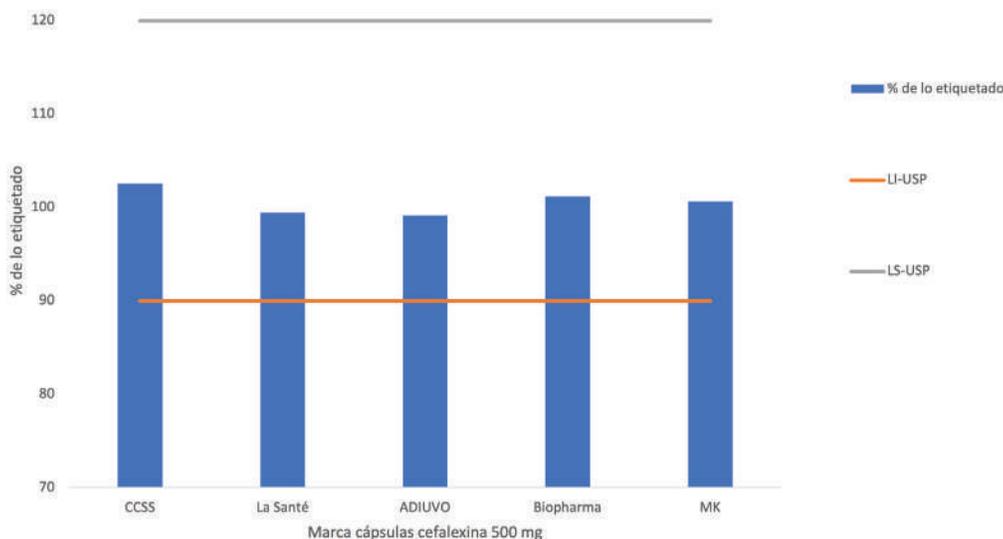


Figura 1. Análisis de resultados para la valoración de principio activo en cefalexina cápsulas 500 mg de distintas marcas

De igual forma, en lo que corresponde a la prueba de disolución; los resultados en el Cuadro 3, permiten destacar que todas las cápsulas individuales, sin importar la marca, se disolvieron por encima del 100% con respecto a la cantidad declarada en la etiqueta (500 mg); y los promedios de porcentaje disuelto por marca oscilan entre 110% y 117%, con desviaciones estándar relativas entre 1,07% en el caso de la marca La Santé y 4,90% en las cápsulas que distribuye la CCSS.

Cuadro 3. Resultados de la prueba de disolución para las cinco marcas comerciales de cefalexina cápsulas expresado como % disuelto.

Muestra	CCSS	La Santé	ADIUVO	Biopharma	MK
1	100.01	117.27	104.44	113.51	113.73
2	109.31	117.49	111.52	116.83	118.82
3	113.29	115.95	112.85	115.28	119.26
4	114.18	117.05	112.41	115.50	107.98
5	109.75	115.50	107.98	117.94	118.38
6	114.18	119.04	111.08	113.95	112.41
Promedio	110.12	117.05	110.04	115.50	115.64
DSR (%)	4.90	1.07	2.94	1.45	3.90

Estos resultados obtenidos para la prueba de disolución; en las cápsulas de cefalexina de las cinco marcas analizadas; hacen posible visualizar que los resultados son satisfactorios en vista del cumplimiento con respecto al criterio de aceptación definido por la farmacopea, el cual establece que la disolución del fármaco no puede ser menor a Q+5%, (donde Q=80%) para cada unidad ensayada, en un tiempo de 30 minutos definidos para la prueba según la monografía específica [12] y como se aprecia en los resultados, todas las marcas tienen porcentajes de

disolución por encima del 100% disuelto con respecto a lo etiquetado (ver Figura 2); por lo que, su uso es confiable para las personas en términos de asegurar la solubilidad del fármaco en el organismo y cumplir el efecto terapéutico para el cual se suministra.

Con respecto a la prueba de disolución, la Dirección de Regulación de la Salud [15], hace referencia a que la prueba de rendimiento sirve para la determinación de la velocidad de disolución de un medicamento empleando los criterios específicos definidos para cada medicamento en específico.

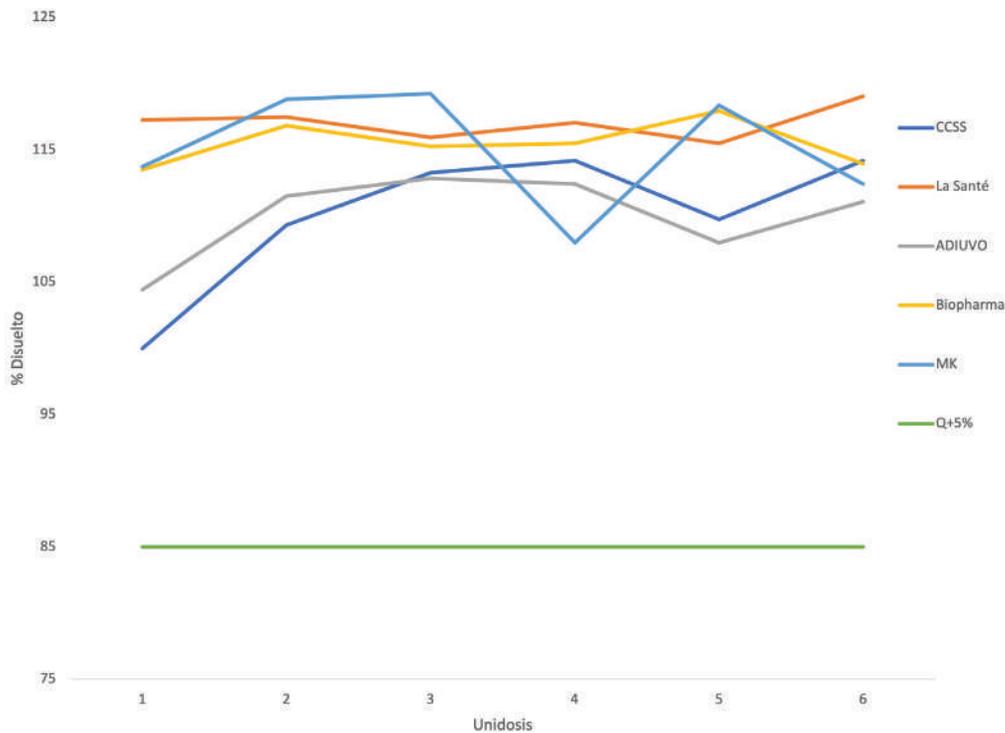


Figura 2. Análisis de resultados para la prueba de disolución de cefalexina cápsulas 500 mg de distintas marcas.

Por último, en lo que respecta a los resultados de la uniformidad de dosis unitaria por variación de peso, en el Cuadro 4, se puede destacar que los pesos obtenidos para las cápsulas individuales, sin importar marca, representan contenido de principio activo no menor a 93,77% de lo etiquetado como en el caso de una cápsula de la marca Biopharma y alcanza valores de hasta 108,86% de lo etiquetado como en el caso de una de las cápsulas de la marca que distribuye la CCSS. Tales diferencias se deben principalmente a variantes particulares del proceso de manufactura de cada lote de cápsulas de cefalexina según la marca del producto.

Por su parte, en cuánto a la variabilidad presentada, lo cual representa la esencia que pretende medir esta prueba, se obtuvieron desviaciones entre 1,39% en el caso de la marca La Santé y 4,55% para las cápsulas de la marca ADIUVO y con respecto al valor de aceptación AV este osciló entre 3,3 y 11,19 entre las distintas marcas, siendo el más bajo el obtenido para la marca La Santé y el AV más alto el de la marca que distribuye la CCSS.

Cuadro 4. Uniformidad de dosis por variación de peso en cefalexina cápsulas expresado como % de lo etiquetado.

Muestra	CCSS	La Santé	ADIUVO	Biopharma	MK
1	105.26	96.96	98.60	93.77	101.01
2	105.66	99.70	100.64	100.97	98.50
3	96.85	100.57	102.72	101.94	103.51
4	99.31	99.72	101.27	101.38	100.11
5	97.23	97.07	94.04	100.80	100.43
6	106.37	97.42	101.63	102.49	103.16
7	104.93	99.37	107.74	103.40	99.13
8	102.38	100.55	95.01	102.20	99.09
9	108.86	99.79	94.34	102.77	103.98
10	103.14	98.85	95.01	100.27	101.08
Promedio	103.00	99.00	99.10	101.00	101.00
DSR%	3.92	1.39	4.55	2.69	1.94
AV	11.19	3.3	10.8	6.52	4.97

Esta prueba se lleva a cabo para determinar la variabilidad en el contenido de principio activo por unidad de dosificación en un lote dado, y cada unidad ensayada en el lote específico debe tener un contenido de fármaco dentro de un intervalo estrecho alrededor de la cantidad declarada. En este caso, todas las cápsulas de las distintas marcas consideradas cumplen con el criterio para el valor de aceptación definido para la prueba según la farmacopea oficial, el cual se establece en un AV no mayor a 15 [12] para 10 cápsulas analizadas en cada producto de las distintas marcas (ver Figura 3).

Considerando lo anterior, el cumplimiento de la prueba de uniformidad brinda garantía al consumidor, de que, al proceder a la ingesta del fármaco medicado, cada cápsula contiene al menos, lo mínimo necesario de principio activo para recibir el efecto curativo deseado al ingerir según la indicación médica, y que, no contiene más de lo recomendado de principio activo para no ocasionar afectación por sobredosis y los efectos indeseados que esto pudiera generar.

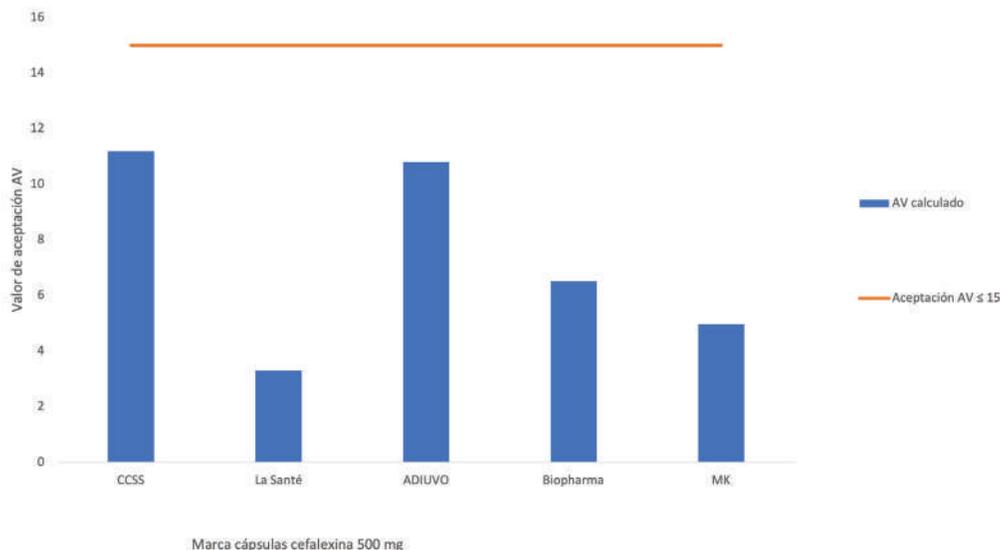


Figura 3. Análisis de resultados para la prueba de uniformidad por variación de peso en cefalexina cápsulas 500 mg de distintas marcas

No existe una regla que regule el peso que deben poseer las dosis de un medicamento determinado, ya que queda a disposición de cada laboratorio fabricante estipular el peso de la unidad, el cual puede variar debido a diversos factores como: tipo, cantidad y voluminosidad de los excipientes utilizados en la formulación; y el estricto cumplimiento de las buenas prácticas de fabricación durante el proceso de manufactura aseguran la uniformidad del peso en la tableta [16]. Lo que si está claro, es que la cantidad de principio activo, más allá del peso total de la unidad, debe estar contemplado dentro de lo establecido a nivel de las farmacopeas oficiales, y al ser suministrado el fármaco, este nunca debe sobrepasar la recomendación médica para lograr el efecto terapéutico previsto sin afectación colateral más allá de lo esperado.

Conclusiones

- Considerando la prueba de calidad farmacopeica de valoración de principio activo ensayada a las cápsulas de cefalexina 500 mg, realizada a muestras de un lote específico de cada uno de los cinco productos contemplados en la investigación, se establece que todas las marcas cumplen con los criterios de aceptación definidos oficialmente para el contenido de principio activo en cada producto: 90-120% de lo etiquetado, lo cual asegura la cantidad de principio activo necesario para ejercer el efecto farmacológico indicado.
- En lo que respecta a la prueba de disolución realizada según los estándares y parámetros oficiales USP, a seis unidades de cada marca contemplada, se establece el cumplimiento del criterio de aceptación al obtener que cada cápsula sometida al proceso de disolución logró alcanzar la disolución de la cefalexina en no menos de $Q + 5\%$, donde $Q = 80\%$.
- La prueba oficial farmacopeica de uniformidad de unidades de dosificación por variación de peso, a diez cápsulas de cada una de las cinco marcas contempladas en el estudio, fue posible establecer el cumplimiento de los criterios oficiales establecidos en cuanto a que la estimación del valor de aceptación AV no fue mayor a 15 en todos los productos contemplados, lo cual se relaciona directamente con poca variabilidad en el contenido de cefalexina entre las diferentes unidades de un mismo producto en un mismo lote.

Agradecimientos

A la Universidad de Costa Rica, Sede de Occidente, Recinto de Grecia.

Participación de autores

EPL: desarrolló el diseño metodológico; SPL: realizó la recolección y análisis de datos; EPL y SPL: redactaron el manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- [1] García Borges, L., García Peña, C., López Armas, M., Martínez Espinosa, V., Fernández Martínez, A., & Cárdenas Peña, M. Evaluación del desempeño del método analítico para la cuantificación de la materia prima de cefalexina, cefaclor, cefoxitina sódica y cefixima. *Revista Cubana de Farmacia*. 2016; 50(3). Obtenido de: <http://www.revfarmacia.sld.cu/index.php/far/article/view/36/40>
- [2] Gómez, J.; García, E. & Hernández, A. Los betalactámicos en la práctica clínica. *Revista Esp Quimioter*. 2015; 28 (1):1-9. Obtenido de: https://seq.es/wp-content/uploads/2015/02/seq_0214-3429_28_1_gomez.pdf

- [3] Gómez, M., & Tito, V. Análisis multivariado de componentes terpénicos, en aceite esencial de hierba luisa (*Cymbopogon citratus*), mediante espectrofotometría UV-Visible Derivada (Bachelor's thesis). 2017. Obtenido de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14765>
- [4] Chorilli, M; Souza, A.; Corrêa, F & Salgado, H. Estudo de perfil de dissolução dos medicamentos de referência, genérico e similar contendo cefalexina na forma farmacêutica capsula. *Revista de ciências farmacêutica básica e aplicada*. 2010; 31(1):69-73. Obtenido de: <http://rcfba.fcfar.unesp.br/index.php/ojs/article/view/413>
- [5] Cuencas, S. Desarrollo y Validación de un método analítico para la valoración de cefalexina comprimidos de 500 mg por espectrofotometría ultravioleta. Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia. 2016. Obtenido de: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/17355/T-1900.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [6] Caseres, M. & Fretes, S. Comparación de la cefalexina 500 mg nacional e importada en Paraguay. *Revista de Ciências de la salud UDES*. 2017; 4(2):85-89. Disponible DOI:10.20320/rfcsudes.v4i2.204Alarcón, A. & Celaguachay, C. Estudio comparativo de los parámetros fisicoquímicos de cefalexina 500 mg cápsulas genéricas de dos laboratorios farmacéuticos ecuatorianos frente al medicamento innovador. Universidad de Guayaquil. Ecuador. 2021; Obtenido de: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/50868>
- [7] Pérez, E. Análisis comparativo de la uniformidad de contenido en tabletas de sildenafil (50 mg/tab) de un producto genérico y el medicamento original. *Rev. Pensamiento Actual*. Universidad de Costa Rica. 2015; Vol. 14 N.23. pp.71-80. Obtenido de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pensamientoactual/article/view/19195/19281>
- [8] Pérez, E. & Rojas, A. Validación de un método para la cuantificación de acetaminofén en tabletas de 500 mg por espectrofotometría ultravioleta para la prueba de uniformidad de contenido. *Revista Intersedes*. 2016. Disponible: <https://doi.org/10.15517/isucr.v17i35.25563>
- [9] Pérez, E.; Cordero, J. & Bastos, H. Evaluación de los parámetros de calidad en tabletas de ibuprofeno que se consumen en Costa Rica. *Revista Pensamiento actual*. Universidad de Costa Rica. 2020; 20 (34). 99-114. Disponible DOI: 10.15517/PA.V20I34.41787USP 43 - NF 38. *Farmacopea de los Estados Unidos de América*. Rockville, Maryland: The United States Pharmacopeial Convention. 2019.
- [10] Rodríguez, A. El valor del principio activo. *Engenerico*. 2016. Obtenido de: <https://www.engenerico.com/el-valor-del-principio-activo/>
- [11] Mendoza, O. Estabilidad de medicamentos. *Bmeditores*. 2021. Obtenido de: <https://bmeditores.mx/entorno-pecuario/estabilidad-de-medicamentos/>
- [12] Dirección de Regulación de la Salud. Guía para la verificación de la calidad de los medicamentos. 2009. Obtenido de: https://admin.colfar.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=409:productos-farmaceuticos-medicamentos-para-uso-humano-verificacion-de-la-calidad&id=9:leyes-y-reglamentos&Itemid=217&start=20
- [13] Awofisayo, S., Willie, E. & Umoh, E. Quality Control Evaluation of Multi-Source Artemether-Lumefantrine Tablets Prescribed for Uncomplicated Multi-drug Resistant Malaria. *Indian Journal of Novel Drug Delivery*. 2010; 2(4):153-157. Obtenido de: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113162452>
- [14] Mendoza, O. Estabilidad de medicamentos. *Bmeditores*. 2021. Obtenido de: <https://bmeditores.mx/entorno-pecuario/estabilidad-de-medicamentos/>
- [15] Dirección de Regulación de la Salud. Guía para la verificación de la calidad de los medicamentos. 2009. Obtenido de: https://admin.colfar.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=409:productos-farmaceuticos-medicamentos-para-uso-humano-verificacion-de-la-calidad&id=9:leyes-y-reglamentos&Itemid=217&start=20
- [16] Awofisayo, S., Willie, E. & Umoh, E. Quality Control Evaluation of Multi-Source Artemether-Lumefantrine Tablets Prescribed for Uncomplicated Multi-drug Resistant Malaria. *Indian Journal of Novel Drug Delivery*. 2010; 2(4):153-157. Obtenido de: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113162452>

Micorremediación: el caso de *Pleurotus ostreatus* sobre polímeros sintéticos como el acetato de celulosa

Mycoremediation: the case of *Pleurotus ostreatus* on synthetic polymers such as cellulose acetate

Isabel Barrantes-Jiménez¹, Ericka Marín-Sandí²,
Monica Murillo-Murillo³, David Rojas-Rojas⁴, Sergio
Vallecillo-Cedeño⁵, Sebastián Valverde-Rojas⁶

Fecha de recepción: 22 de febrero, 2023

Fecha de aprobación: 8 de junio, 2023

Barrantes-Jiménez, I; Marín-Sandí, E; Murillo-Murillo, M;
Rojas-Rojas, D; Vallecillo-Cedeño, S; Valverde-Rojas, S.
Micorremediación: el caso de *Pleurotus ostreatus* sobre polí-
meros sintéticos como el acetato de celulosa. *Tecnología en
Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 15-22.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6478>

- 1 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 2 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 3 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: momurmur24@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-2721-1863>
- 4 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 5 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- 6 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Palabras clave

Fungi; biodegradable; acetilsterasa; plástico; colillas de cigarro.

Resumen

Los hongos pueden ser utilizados para remover o degradar compuestos contaminantes por medio de un proceso de micorremediación. En ocasiones incluso de manera más eficiente que los procariontes, por lo que pueden ser utilizados para combatir la contaminación de polímeros no biodegradables. El acetato de celulosa es un material comúnmente utilizado en la fabricación de colillas de cigarrillos, por lo que al ser descartado genera contaminación. El hongo *Pleurotus ostreatus* tiene la capacidad de degradar acetato de celulosa por medio de las enzimas que secreta. La enzima se encarga de hidrolizar el grupo acetilo del acetato de celulosa mientras que enzimas celulolíticas degradan el esqueleto de celulosa en azúcares, polisacáridos o celobiosa. Además del acetato de celulosa, este hongo es capaz de degradar otros polímeros convencionalmente no biodegradables por lo que tiene el potencial de ser utilizado para reducir la contaminación. El cultivo del hongo a gran escala ha demostrado ser más viable económicamente que los métodos de tratamiento convencionales de polímeros no biodegradables lo cual es una ventaja adicional que presenta.

Keywords

Fungi; biodegradable; acetylsterase; plastic; cigarette butts.

Abstract

Fungi can be used to remove or break down contaminating compounds through a mycoremediation process. Sometimes even more efficiently than prokaryotes, so they can be used to reduce contamination from non-biodegradable polymers. Cellulose acetate is a plastic normally used in the manufacture of cigarettes, so when it is discarded it generates pollution. The *Pleurotus ostreatus* fungus has the ability to degrade cellulose acetate through the enzymes it secretes. The enzyme is responsible for hydrolyzing the acetyl group of cellulose acetate while cellulolytic enzymes break down the cellulose skeleton into sugars, polysaccharides or cellobiose. In addition to cellulose acetate, this fungus is capable of breaking down other conventionally non-biodegradable polymers, so it has the potential to be used to reduce pollution. Large-scale cultivation of the fungus has proven to be more economically viable than conventional non-biodegradable polymer treatment methods, which is an additional advantage it presents.

Introducción

Los hongos son organismos eucariontes que se alimentan de fuentes de carbono, asociada con una alta tasa de degradación, ya que en su etapa micelial, secretan enzimas extracelulares y ácidos que le dan la capacidad de descomponer compuestos orgánicos más complejos[1]. Además de degradar compuestos de carbono, tienen un papel importante en biotecnología ambiental, gracias a su capacidad de lixiviación, recuperación y detoxificación de metales, degradación de xenobióticos y contaminantes orgánicos [2].

La micorremediación es un tratamiento biológico, en el que de manera sustentable se remueven hidrocarburos aromáticos policíclicos nocivos, compuestos orgánicos con halógenos, hidrocarburos de petróleo, colorantes, pesticidas y compuestos inorgánicos; mediante la utilización de hongos[3]. Este tratamiento biológico es muy eficaz y es superior a las bacterias en su rendimiento, ya que son más competentes en cometabolismo y bioacumulación [4].

Una serie de cepas fúngicas han demostrado ser degradadores de contaminantes importantes. La degradación de 2,4-diclorofenol es posible con el hongo *Lentinula edodes*[5]. El 2,4-diclorofenol se encuentra en el lugar 243 de los compuestos fenólicos con mayor toxicidad según La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)[6], y al ser un compuesto orgánico persistente, su micorremediación resulta de gran importancia ambiental.

Se ha estudiado también la micorremediación del hongo *Pleurotus pulmonarius* con residuos radioactivos de base celulósica, mostrando altas tasas de degradación[7]. Adicionalmente, han encontrado otros usos posteriores a la degradación como se señala en *Cementation of Bioproducts Generated from Biodegradation of Radioactive Cellulosic-Based Waste Simulates by Mushroom* de Eskander *et al.*[7], en donde los productos de la degradación se están estudiando para generar cemento Portland.

Otro caso estudiado es el de la degradación del verde malaquita, un compuesto orgánico utilizado como colorante[8]; el trabajo de Yogita *et al.*[9] demostró la degradación de este colorante con los hongos *Jelly sp.*, *Schizophyllum commune* y *Polyporus sp.*, durante 10 días y con hasta 99.7% de efectividad.

Por otra parte, el hongo *Pleurotus pulmonarius* se ha caracterizado como una especie capaz de degradar petróleo, y por ello es una solución para la biorremediación de suelos contaminados por petróleo, teniendo un impacto positivo en el ambiente[10]. En un estudio en 2015 Villacres Manzano demostró cómo el hongo *Trametes versicolor* ha generado tasas excelentes de biodegradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Dichos hidrocarburos son un grupo de más de 100 sustancias que se forman durante la combustión incompleta del carbón, petróleo y gasolina, además de otras sustancias orgánicas[11].

Se ha demostrado además que el hongo *Melanized fungi*, es capaz de absorber metales pesados y contaminantes radioactivos de efluentes industriales[12]. Así mismo, cepas de *Pleurotus platypus*, *Agaricus bisporus* y *Calocybe indica*, han demostrado su capacidad como bioabsorbentes los iones Cobre, Zinc, Hierro, Cadmio, Plomo y Níquel en soluciones acuosas[13].

De esta manera, diferentes cepas fúngicas han demostrado generar beneficios en cuanto a micorremediación y aportan a los procesos biológicos y químicos ya existentes, puesto que pueden biodegradar contaminantes que no habían sido posibles de remover o reducir mediante métodos químicos o con otros organismos como procariotas[14].

Degradación del acetato de celulosa por *P. ostreatus*

El acetato de celulosa (CA) tradicionalmente se consideró un polímero no biodegradable, pero a principios de los noventas se demostró su biodegradabilidad [15, 16].

El primer paso para la degradación del CA, al igual que el paso determinante en la velocidad de este proceso, es la escisión del grupo acetilo [17]. Las acetil esterasas han sido reconocidas como enzimas capaces de hidrolizar este grupo, específicamente acetil xilano esterasas [17]. El xilano y su forma acetilada, el acetil xilano, se encuentran en muchas plantas [18]. El xilano es un componente de la hemicelulosa, un compuesto que los hongos saprofitos se han adaptado a degradar [19], y el acetil xilano comparte con el CA, tanto la similitud de ser un polisacárido con un esqueleto de glucosa esterificado con grupos acetilo, como también que sus sustituyentes acetilo están dispuestos de forma idéntica en el plano ecuatorial [20]. Por lo que enzimas capaces de desacetilar este compuesto son las candidatas perfectas para catalizar la reacción equivalente en el CA, y en efecto, este polímero ha sido reportado como sustrato de diferentes acetil xilano esterasas [21].

Una vez el grupo acetilo del CA ha sido removido, el siguiente paso es degradar el esqueleto de celulosa. *P. ostreatus* es conocido por su capacidad para degradar celulosa y lignina mediante el uso de enzimas extracelulares [22], así que esta etapa del proceso es más rápida. Estas enzimas celulolíticas son las celulasas/glucanasas, las cuales normalmente degradan la celulosa en las paredes celulares de las plantas [23, 24]. Dentro de esta categoría de enzimas se encuentran las endoglucanasas y exoglucanasas, la diferencia principal entre estos dos tipos de enzimas es que las endoglucanasas escinden de manera aleatoria la celulosa, produciendo azúcares más pequeños y polisacáridos oligoméricos [23], mientras que la exoglucanasa actúa desde los extremos reductores o no reductores de una cadena de celulosa para liberar celobiosa como producto principal [25]. Para la degradación del CA, se prefiere la exoglucanasa aunque de hecho, existen propiedades sinérgicas entre las exoglucanasas y acetil esterases para la destrucción de este polímero [21].

Otras tres clases de enzimas relevantes presentes en *P. ostreatus* con capacidad de degradación son: lignina peroxidasas, peroxidasas dependientes de manganeso y lacasas [26]. Su principal mecanismo de acción es la creación y uso de radicales libres para destruir polímeros sintéticos como el CA [26].

Uso de *P. Ostreatus* para la degradación de otro tipo de polímeros

Cabe aclarar que el uso del hongo *P. Ostreatus* a nivel industrial no es algo nuevo, ya que diferentes compañías se han desempeñado en la biodegradación de polímeros, usando las propiedades químicas y biológicas del hongo. Ejemplo de ello, es una empresa mexicana encargada de la recolección y degradación de colillas de cigarro. Tan solo en México se desechan 5 mil millones de colillas al año, equivalentes a 22,150 toneladas de basura, de acuerdo con la Secretaría de Salud. Estos desechos representan entre 30% y 40% de los residuos recogidos en actividades de limpieza urbana y costera [27].

Ahora bien, expandiendo el uso del hongo en la degradación de otros polímeros, se han realizado investigaciones con el Polietileno Verde, hecho a partir del etileno obtenido de la caña de azúcar. Da Luz y colaboradores (2013) explican que *P. ostreatus* puede degradar y producir enzimas utilizando desechos plásticos oxo-biodegradables sin tratamiento físico previo [28]. Se explica también que *P. ostreatus* es un hongo lignocelulolítico que puede utilizar lignina, celulosa y hemicelulosa como fuentes de carbono y energía [29,30]. Este hongo ha sido utilizado en la degradación de residuos agroindustriales [29,32] la biorremediación de contaminantes [31] y el blanqueo de pulpa [32]. La capacidad de los hongos lignocelulolíticos para degradar una amplia gama de compuestos, está relacionada con la alta eficiencia de su sistema enzimático.

Tratando de relacionar las propiedades de los lignocelulolíticos con la degradación de los plásticos oxodegradables y cómo ocurren estos procesos, un argumento se basa en la acción de este grupo de enzimas en un proceso cometabólico [28]. Los procesos cometabólicos se utilizan comúnmente en el tratamiento de compuestos recalcitrantes, donde se agrega una fuente de carbono para inducir la síntesis de ciertas enzimas, que degradan los sustratos naturales así como también contaminantes o residuos no deseados [33]. Otro tipo de polímero del cual se han realizado estudios para verificar la efectividad respecto a su degradación, es el poliestireno expandido (EPS) siendo este un termoplástico utilizado en la industria para la construcción, aislamiento térmico, acústico y el empaque de objetos y alimentos [34]. Todos estos polímeros comparten similitudes en sus propiedades que hacen que sean degradables en contacto con el hongo, sin embargo, cabe aclarar que intervienen factores como la temperatura, humedad, tiempo, entre otros, que puedan modificar el metabolismo del hongo sobre el polímero.

Impacto Ambiental y económico sobre los medios de degradación de *P. ostreatus*

El efecto degradador de *P. ostreatus* sobre el acetato de celulosa en las colillas de cigarro es de gran relevancia puesto que estas representan un problema medio ambiental del cual no se aprecia su magnitud [35]. Una sola puede contaminar hasta 50 litros de agua y, se calcula que pueden durar hasta 25 años en degradarse [36]. El impacto en la industria de la agricultura del arroz, se destaca por el uso de *P. ostreatus* como microorganismo para el pretratamiento fúngico, para la deslignificación del polímero de lignocelulosa (polímero que compone la cascarilla de arroz) propiciando la modificación para la conversión de biometano a partir de la biomasa lignocelulósica como una de las mayores fuentes de energía renovable a partir de biomasa en el mundo [37, 38], esto porque se ha encontrado factores que afectan la hidrólisis enzimática de la lignocelulosa [39], provocando a que a nivel industria/economía no se aproveche el desecho de arroz y a nivel ambiental produzcan contaminación [40]. Así mismo, la industria de polietileno verde ha utilizado el organismo *P. ostreatus*, ya que a pesar de que estos plásticos son de fácil degradación, no hay información disponible sobre la vida media o la tasa de degradación cuando se desechan en el medio ambiente y a su vez, se ha demostrado facilitar la mineralización del polímero [41], debido al complejo de enzimas lignocelulolíticas que produce el hongo basado en el mismo principio de la degradación del acetato de celulosa [42, 43].

Sustentabilidad ambiente-economía del cultivo *P. ostreatus*

Según Peña (2017) [14], la diferencia en costos de aplicación entre los métodos de tratamiento convencionales y los relacionados con organismos biológicos, es bastante considerable, además de implicar una menor inversión económica, se garantiza la protección de la calidad del medio ambiente, para funcionar dentro de los límites del ecosistema.

Además de sus beneficios ambientales, el hongo *P. ostreatus*, tiene gran factibilidad económica para ser cultivado a gran escala para su utilización. Refiriéndose a la investigación en 2019 [44], donde se indica que se obtuvo una tasa interna de retorno (TIR) del 18%, dando resultados favorables con respecto a la inversión y apuntando hacia una viabilidad económica sustentable.

Actualmente algunas empresas utilizan sistemas que generan ganancias económicas a través de prácticas que favorecen la disminución de la contaminación. Con el caso de las colillas de cigarro, se emplean distintos modelos de negocio, el primero es el de recolección voluntaria, donde múltiples establecimientos se organizan para colocar contenedores de desecho, además de coordinar su recolección, obteniendo beneficios como certificaciones y ser identificados como “empresa responsable” con sus desechos; como segunda línea de negocio, la venta de contenedores de desecho a empresas, instituciones gubernamentales, entre otras, con el servicio de instalación y recolección, una tercera línea es la venta de productos a partir de la pulpa de celulosa biodegradable, como macetas (hechas con 25 colillas), lápices (10 colillas), hojas de papel y hasta bisutería. A partir de esta idea, surgió una cuarta línea de negocio con un modelo B2B; la venta de pulpa de celulosa, a fábricas de papel y cartón, la cual se ha convertido en la vertiente más rentable, ya que se oferta como materia prima y a gran escala [27].

Consideraciones finales

Se cuenta con suficiente evidencia reportada sobre la capacidad de *P. Ostreatus* para la degradación de polímeros como el CA. La capacidad de micorremediación de este hongo y su viabilidad económica le dan el potencial de utilizarse para degradar desechos y contaminación debido a biopolímeros. El integrar organismos vivos como el hongo *P. Ostreatus* en distintos

sectores industriales lleva a nuevas oportunidades de implementar procesos biológicos que beneficien al ambiente. Adicionalmente, en el ámbito de la enzimología es importante un mayor desarrollo de estudios para comprender de forma más específica la degradación biológica de polímeros sintéticos.

Referencias

- [1] L. Romero-Bautista, M. Á. Islas-Santillán, M. López-Herrera, N. Ayala-Sánchez, and I. E. Soria-Mercado, "Los hongos poliporoides de la subcuenca del río Metztlán, Hidalgo, México," *Estudios en Biodiversidad*, vol. 1, pp. 196–209, 2015.
- [2] G. Gadd, "Mycotransformation of organic and inorganic substrates", *Mycologist*, vol. 18, no. 2, pp. 60-70, 2004. Disponible: 10.1017/s0269915x04002022. [Consultado: 03-oct-2022].
- [3] M. Mathur, P. Gehlot, "Mechanistic evaluation of bioremediation properties of fungi", In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, vol 1, pp. 267–286, 2020.
- [4] M. Medaura, M. Guivernau, F. Boldú, X. Moreno y M. Viñas, M. (2013). "Mikorremediación y su aplicación para el tratamiento de suelos contaminados con hidrocarburos pesados", *V REDISA*, vol 1, pp. 1-7, 2013.
- [5] S. Tsujiyama, T. Muraoka y N. Takada, "Biodegradation of 2,4-dichlorophenol by shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using vanillin as an activator", *Biotechnology Letters*, vol. 35, no. 7, pp. 1079-1083, 2013. Disponible: 10.1007/s10529-013-1179-5 [Consultado: 03-oct-2022].
- [6] L. E. Miguel Sánchez, G. Martínez Villa, J. Mentado Morales, M. E. Codero Sánchez, L. G. Zárate López, A. Regalado Méndez, y E. Peralta Reyes, "DEGRADACIÓN ELECTROQUÍMICA DE 2,4-DICLOROFENOL EN UN REACTOR ELECTROQUÍMICO FM01-LC," *Memorias del XXXVIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ*, vol. I, pp. 1–5, Agosto. 2017.
- [7] S. Eskander, S. Abd El-Aziz, H. El-Sayaad and H. Saleh, "Cementation of Bioproducts Generated from Biodegradation of Radioactive Cellulosic-Based Waste Simulates by Mushroom", *ISRN Chemical Engineering*, vol. 2012, pp. 1-6, 2012. Disponible: 10.5402/2012/329676 [Consultado: 03-oct-2022].
- [8] A. Verma et al., "Graphite modified sodium alginate hydrogel composite for efficient removal of malachite green dye", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 148, pp. 1130-1139, 2020. Disponible: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.142 [Consultado: 03-oct-2022].
- [9] R. Yogita, S. Simanta, S. Aparna y S. Kamlesh, "Biodegradation of malachite green by wild mushroom of *Chhatisgrah*", *Journal of Experimental Sciences*, vol 2, pp. 69-72, 2011.
- [10] S. Abiodun y E. Ejiro, "Bioremediation of a Crude Oil Polluted Soil with *Pleurotus Pulmonarius* and *Glomus Mosseae* Using *Amaranthus Hybridus* as a Test Plant", *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, vol. 01, no. 03, 2010. Disponible: 10.4172/2155-6199.1000113 [Consultado: 03-oct-2022].
- [11] E. Villacres Manzano, "Análisis Toxicológico de Hidrocarburos Aplicado a la Salud Ocupacional", Tesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito. 2015.
- [12] E. Dadachova et al., "Ionizing Radiation Changes the Electronic Properties of Melanin and Enhances the Growth of Melanized Fungi", *PLoS ONE*, vol. 2, no. 5, p. e457, 2007. Disponible: 10.1371/journal.pone.0000457 [Consultado: 03-oct-2022].
- [13] Y. Prasad, y D. Sachin, "Biosorption of Cu, Zn, Fe, Cd, Pb and Ni by non-treated biomass of some edible mushrooms", *Asian Journal of Experimental Biological Sciences*, vol 4, no. 2, pp. 190-195, 2013.
- [14] J. Peña Gonzalez, "Procesos de biorremediación en el tratamiento de residuos sólidos del cigarrillo," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62316>
- [15] J.-D. Gu, D. T. Eberiel, S. P. McCarthy, y R. A. Gross, «Cellulose acetate biodegradability upon exposure to simulated aerobic composting and anaerobic bioreactor environments», *J Environ Polym Degr*, vol. 1, n.º 2, pp. 143-153, abr. 1993, doi: 10.1007/BF01418207.
- [16] C. J. Rivard *et al.*, «Effects of natural polymer acetylation on the anaerobic bioconversion to methane and carbon dioxide», *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 34, n.º 1, pp. 725-736, mar. 1992, doi: 10.1007/BF02920592.
- [17] J. Puls, S. A. Wilson, y D. Höltner, «Degradation of Cellulose Acetate-Based Materials: A Review», *J Polym Environ*, vol. 19, n.º 1, pp. 152-165, mar. 2011, doi: 10.1007/s10924-010-0258-0.
- [18] P. Biely, C. R. MacKenzie, J. Puls, y H. Schneider, «Cooperativity of Esterases and Xylanases in the Enzymatic Degradation of Acetyl Xylan», *Nat Biotechnol*, vol. 4, n.º 8, Art. n.º 8, ago. 1986, doi: 10.1038/nbt0886-731.

- [19] U. Tuor, K. Winterhalter, y A. Fiechter, «Enzymes of white-rot fungi involved in lignin degradation and ecological determinants for wood decay», *Journal of Biotechnology*, vol. 41, n.º 1, pp. 1-17, jul. 1995, doi: 10.1016/0168-1656(95)00042-O.
- [20] E. Fernández-Fueyo *et al.*, «A secretomic view of woody and nonwoody lignocellulose degradation by *Pleurotus ostreatus*», *Biotechnology for Biofuels*, vol. 9, n.º 1, p. 49, feb. 2016, doi: 10.1186/s13068-016-0462-9.
- [21] C. Altaner *et al.*, «Regioselective deacetylation of cellulose acetates by acetyl xylan esterases of different CE-families», *Journal of Biotechnology*, vol. 105, n.º 1, pp. 95-104, oct. 2003, doi: 10.1016/S0168-1656(03)00187-1.
- [22] I. Ferreira da Silva, J. M. Rodrigues da Luz, S. F. Oliveira, J. Humberto de Queiroz, y M. C. Megumi Kasuya, «High-yield cellulase and LiP production after SSF of agricultural wastes by *Pleurotus ostreatus* using different surfactants», *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, vol. 22, p. 101428, nov. 2019, doi: 10.1016/j.bcab.2019.101428.
- [23] M. S. Rahman, S. Fernando, B. Ross, J. Wu, y W. Qin, «Endoglucanase (EG) Activity Assays», *Methods Mol Biol*, vol. 1796, pp. 169-183, 2018, doi: 10.1007/978-1-4939-7877-9_13.
- [24] R. M. Yennamalli, A. J. Rader, A. J. Kenny, J. D. Wolt, y T. Z. Sen, «Endoglucanases: insights into thermostability for biofuel applications», *Biotechnology for Biofuels*, vol. 6, n.º 1, p. 136, sep. 2013, doi: 10.1186/1754-6834-6-136.
- [25] M. Hosseini, «Advanced Bioprocessing for Alternative Fuels, Biobased Chemicals, and Bioproducts», Woodhead Publishing, 1st ed. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/advanced-bioprocessing-for-alternative-fuels-biobased-chemicals-and-bioproducts/hosseini/978-0-12-817941-3>
- [26] R. Updyke, «Biodegradation and Feasibility of Three *Pleurotus* Species on Cigarette Filters», The University of Maine, may. 2014. [En línea]. Disponible en: <https://digitalcommons.library.umaine.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1191&context=honors>
- [27] Jiménez, A. Reciclar colillas de cigarro en pro de economía circular - WORTEV. WORTEV Acelerador. Ecofilter. (2022, 29 junio). [En línea]. Disponible en : <https://wortev.com/historias-de-emprendedores/esta-empresa-recicla-las-colillas-de-cigarro-para-contribuir-a-la-economia-circular/>.
- [28] da Luz J, Paes S, Nunes M, da Silva M, Kasuya M. Degradation of Oxo-Biodegradable Plastic by *Pleurotus ostreatus*. *PLoS One*. 2013;8(8):1-8.
- [29] Cavazzalli JRP, Brito MS, Oliveira MGA, Villas-Bôas SG, Kazuya MCM. Lignocellulolytic enzymes profile of three *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler strains during cultivation on eucalyptus bark-based medium. *Food Agric Environ*. 2004;2: 291-297.
- [30] Pérez SR, Oduardo NG, Savón RCB, Boizán MF, Augur C. Decolourisation of mushroom farm wastewater by *Pleurotus ostreatus*. *Biodegradation*. 2009;19: 519-526.
- [31] Sánchez C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *Biotechnol Adv*. 2009;27: 185-194. pmid:19100826.
- [32] Cohen R, Persky L, Hadar Y. Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus *Pleurotus*. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2002;58: 582-594. pmid:11956739.
- [33] Lamia, MH, Farid, Z., Sonia, MA, Sevastianos, R., Samia, A., Véronique, D. y Mouloud K. Selective isolation and screening of actinobacteria strains producing lignocellulolytic enzymes using olive pomace as substrate. *Iranian J Biotechnol*. 2017; 15(1):74-7. Available from: <https://doi: 10.15171 / ijb.1278>
- [34] Mills, N. J., *Plastics: Microstructure and Engineering Applications*, (2005) Amsterdam: Butterworth-Heinemann. Elsevier. Fourth Edition. Cap 3.
- [35] J. M. Rath, R. A. Rubenstein, L. E. Curry, S. E. Shank, y J. C. Cartwright, "Cigarette Litter: Smokers' Attitudes and Behaviors", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 9, núm. 6, pp. 2189-2203, jun. 2012.
- [36] L. C. Hernandez-Rubio, "Estrategias para la Degradación de Colillas de Cigarrillo.", Universidad Javeriana, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/50285/trabajo%20de%20grado%20%20Laura%20Camila%20Hernandez%20Rubio.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Consultado el 03-oct-22]
- [37] J. Kainthola, A. S. Kalamdhad, V. V. Goud, y R. Goel, "Fungal pretreatment and associated kinetics of rice straw hydrolysis to accelerate methane yield from anaerobic digestion", *Bioresour. Technol.*, vol. 286, p. 121368, ago. 2019.
- [38] K. Ziemiński, I. Romanowska, y M. Kowalska, "Enzymatic pretreatment of lignocellulosic wastes to improve biogas production", *Waste Manag.*, vol. 32, núm. 6, pp. 1131-1137, jun. 2012.

- [39] P. Wang et al., “Effect of physicochemical pretreatments plus enzymatic hydrolysis on the composition and morphologic structure of corn straw”, *Renew. Energy*, vol. 138, pp. 502–508, ago. 2019.
- [40] L. Rojas y C. Liliana, “Alternativas de usos de la cascarilla de arroz (*Oriza sativa*) en Colombia para el mejoramiento del sector productivo y la industria”, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/33698>. [Consultado: 03-oct-2022].
- [41] J. M. R. da Luz, S. A. Paes, K. V. G. Ribeiro, I. R. Mendes, y M. C. M. Kasuya, “Degradation of Green Polyethylene by *Pleurotus ostreatus*”, *PLoS One*, vol. 10, núm. 6, p. e0126047, jun. 2015.
- [42] M. Santo, R. Weitsman, y A. Sivan, “The role of the copper-binding enzyme – laccase – in the biodegradation of polyethylene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*”, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 84, pp. 204–210, oct. 2016.
- [43] A. Sivan, “New perspectives in plastic biodegradation”, *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 22, núm. 3, pp. 422–426, jun. 2011.
- [44] E. F. Bermudez Lizarazo, “Estudio de factibilidad para el cultivo de hongo (*Pleurotus sp*) en la Finca Santa Elena del municipio de Suratá, Santander y comercialización en la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana,” Trabajo de grado, Universidad de Santander, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.udes.edu.co/entities/publication/ff09734e-78c6-41f7-a597-6528fac8b290>

Evolution of DevOps: Lessons learned for success as part of digital strategy

Evolución de DevOps: Lecciones aprendidas para el éxito como parte de la estrategia digital

Gabriel Silva-Atencio¹, Mauricio Umaña-Ramírez²

Fecha de recepción: 9 de junio, 2023
Fecha de aprobación: 18 de octubre, 2023

Silva-Atencio, G; Umaña-Ramírez, M. Evolution of Devops: Lessons learned for success as part of digital strategy. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 23-35.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6743>

- 1 Universidad Latinoamérica de Ciencia y Tecnología (ULACIT). Costa Rica.
Correo electrónico: gsilvaa468@ulacit.ed.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4881-181X>
- 2 Universidad Católica de El Salvador (UNICAES). El Salvador.
Correo electrónico: mauricio.umana@catolica.edu.sv
 <https://orcid.org/0000-0002-0733-5183>

Keywords

Agility; lessons learned; DevOps; culture; scrum; XP; methodologies.

Abstract

The objective was to investigate the good practices that must be followed to implement DevOps culture to accelerate the development of software applications in shorter periods and unify the story so they can work hand in hand. The research was under a qualitative approach and a review of references to provide information on the terms and development methodologies used. Finally, to put DevOps into practice, it is necessary to understand that, even if you have the best tools available, if you do not have the culture, you will not get better results since it is a combination of good practices to be able to function. In this sense, to collaborate with this culture change, the support of trained leaders is essential, who support and sponsor the new way of working, where all areas of the company can be integrated.

Palabras clave

Agilidad; lecciones aprendidas; DevOps; cultura; scrum; XP; metodologías.

Resumen

El objetivo fue investigar las buenas prácticas que se deben seguir para implementar la cultura DevOps para acelerar el desarrollo de aplicaciones de software en periodos más cortos y unificar la historia para que puedan trabajar de la mano. La investigación fue bajo un enfoque cualitativo y una revisión de referencias para proporcionar información sobre los términos y metodologías de desarrollo utilizadas. Finalmente, para poner en práctica DevOps, es necesario entender que, aunque se tengan las mejores herramientas disponibles, si no se cuenta con la cultura, no se obtendrán mejores resultados ya que es una combinación de buenas prácticas para poder funcionar. En este sentido, para colaborar con este cambio de cultura, es fundamental el apoyo de líderes capacitados, que apoyen y apadrinen la nueva forma de trabajo, donde se puedan integrar todas las áreas de la empresa.

Introduction

Software development has become almost a necessity in organizations because it allows the use of tools that make information available to employees in the performance of their work activities and make decisions according to actual data, improving response times and meeting the needs of their customers in a timelier manner. With time, methods have been presented that allow agile development, managing to accelerate the growth of software applications in shorter periods; this is because it is not enough to have an Information Technology (IT) department, but it is required to implement products quickly and with the ability to adapt to change [1]. With the emergence of functional outcomes in a short time, it should be facilitated, accelerated, and transferred to the production area repeatedly. So, it would be best to have a comprehensive risk control, with contingency plans, periodic reviews, and steps to follow if the risks materialize.

The emergence of agile development methodologies creates new challenges at the organizational level since product launches are produced in less time [1], generating more work for the operational area, accumulating a stored position, and awaiting attention to be transferred to the production area. This creates the need to look for strategies that help rearrange how organizations operate to avoid these barriers between departments.

For this reason, between the years of 2007 and 2008, the DevOps concept appeared [2]; it is a philosophy, an approach, and a change of culture based on good practices, which manage to remove the divisions that exist between the operations area and the IT development area so that they can work hand in hand, achieving greater productivity, promoting communication, the collaboration between people, feedback, and therefore, performs the automation and integration of the two areas [3]. This solution is implemented by large companies worldwide and has been proven to work [4].

Companies or institutions that wish to implement the DevOps culture must face significant challenges and measure if they are prepared for this change, in addition to continuously evaluating themselves to know if they are achieving the objectives this new way of working promises. It must be evident that this change only happens in the short term; it takes time, effort, and continuous improvement, in addition to the collaboration of all the people in the organization to optimize the results [5]. So, in this article, we investigated the methods, tips, and good practices that should be followed for its implementation, as the need to apply evaluations to work done by the teams to analyze whether or not communication, the collaboration between people, and other aspects with which you can check the achievement of the objectives of the organization when implementing DevOps.

With this organizational change, companies have an essential ally, which is the use of the tools already available in the market to implement DevOps that allows them to meet the requirements and needs of the business. However, for this research, the software designed by Microsoft Corporation [6], MS Team Foundation Server (TFS), will be taken as a case study to check the value it can provide to organizations and collaborators in this new need for change.

Additionally, it was analyzed whether, in a DevOps implementation, it is necessary to create new roles or positions in the organizations so that they can help coordinate, guide, or advise the new ways of working. We also analyzed the changes that must be implemented in the work cycles to unify the personnel of the different departments managing each development stage in another way. In the market, various tools collaborate with implementing DevOps in organizations of form agile developed to help companies accelerate the process of developing and delivering products and services, allowing them to reduce their time-to-market. Still, for this article, we only studied the TFS tool, its advantages, and whether it has facilities to cooperate with the change of culture.

Literature review

Software development has not been evolving in all organizations in the same way; some continue with traditional methodologies, where changes are difficult to implement, users do not have much interaction, have much documentation, are process-oriented, are very predictable, product delivery at the end of the project and sometimes cost estimates, time or development functionalities throughout the project, are no longer what was planned in the initial stages [7]. It is essential to mention that for a long time, these methodologies were successful; however, for other companies or institutions, these techniques no longer meet their needs, so they had to look for other, more agile methods.

Therefore, in 2001 a document known as the Agile Manifesto was created, where several principles are mentioned to develop software faster. Among the principles mentioned in the paper are: individuals, tools, and interactions over processes; working over extensive documentation; and response to change over following a plan [7]. With this, we can see that the vision of the way we were working had to change since we were emphasizing aspects that

did not need so much effort, such as documentation, to have that time and plan more efficiently the constant changes that could occur according to the needs of the business in the different stages or phases of the project.

After this publication, different agile development methodologies appeared; Scrum and Extreme Programming (XP) are the most known. In each method, the ways of working are defined, each with its roles, work groups, and the same objective of developing high-quality software quickly that meets the goals of the user or customer [7].

The scrum methodology works with small groups of less than ten people (recommended); the interactions can last two to four weeks, according to the needs. It can be used in any project, regardless of size, and three roles are defined: Scrum Master (SM), Product Owner (PO), and Development Team (DT) [7].

The PO is accountable for making decisions about the product, providing value, and knowing the business; this role is intended to simplify communication, as it falls on a single person. The DT to develop the product; they are not distinguished with separate roles, instead what is sought is that the responsibility for the deliverable belongs to everyone; they are self-organized and collaborate; they respect each other's opinions and work for the same goal since everyone is essential. Finally, there is the role of the SM, who leads the project, collaborates with the communication between the Product Owner and the Development Team, and guides so that the Scrum rules comply with Menzinsky, López and Palacio [8].

In XP, people work in pairs, which seeks to reduce development costs and increase quality; interactions are from one to three weeks, and requirements are documented in detail as user stories and are given priority and estimated times. It is used in small projects; seven roles are defined: Coach, Programmer, Tracker, Customer, Consultant, Tester, and the Big Boss [9].

Among the most critical roles of this methodology, we have the Programmer, who is responsible for all the stages of product creation and can be said to be similar to the part of the Scrum Development Team. The customer is responsible for writing the user stories based on the requirements and verifying the advanced functionalities' testing. The Big Boss is in charge of project coordination, collaborates with the teams' training, and provides the resources needed by those teams [9].

So, both methodologies have succeeded in enabling development teams to deliver functional products that need to be put into production for customers to use more interactively. This is being implemented in many places where software developers can see the significant advantages that this achieves. Still, not all problems end there, since increasing the productivity of development also increases the traffic of requests to the operations area, who are responsible for putting these developments into production, which causes bottlenecks, so that a new case to be solved is in sight.

The people in charge of software development are in the development area (Dev/Development), and the operations area is the people putting the products into production and attending to the different user requests. They are also the ones who know the business best (Ops/Operations). The union of these two areas creates the word DevOps, which seeks the elimination of barriers between the regions, achieving greater visibility and collaboration between them. With the teamwork of these two departments, more significant innovation is sought, managing regulatory restrictions more agilely. With this, it is about obtaining operational excellence with the high availability of the tools and the advantage of recovering faster [10].

With this new term, it is possible to give importance to the participation of people in organizations. With the above, there might be many automated tools and efficient processes, which are only helpful if people have collaborative attitudes and can execute efficiently. Achieving a DevOps

culture is not an easy task; it requires constant communication between all stakeholders, leaders who monitor that an environment of synergy is being created and that there is an exchange of knowledge, in addition to removing barriers that may arise that interfere, and that there is a shared responsibility of the areas in achieving the objectives [11].

Now, to implement DevOps, the first thing is to understand what the business needs are, what is failing, or what can be improved; with this, you can have an accurate picture on which they can be based to raise the strategies to follow, and the goals they are looking for DevOps helps greatly in three areas: the customer experience is improved since it is attended or can take into account the feedback, which causes satisfaction; increases the capacity for innovation, achieving that increases the value, with this it is meant that by increasing productivity increases efficiency, changes the culture; and finally, the automation of application delivery is increased [11].

Among the techniques used in adopting DevOps is continuous improvement, in which lessons learned are considered, as well as the observations that are head of the processes and products that the organization has. Another of the techniques used is the planning of deliveries; this is due to the number of deliveries generated in short periods, so the aspects to be taken into account in each process must be studied without neglecting quality assurance. Also, there is continuous integration because each team member can work separately on a specific change. When it is finished, it should be able to join the project quickly and agile. Another aspect to consider is to give continuous follow-up and feedback, that is, to monitor what is in production in terms of performance and ensure that it meets the expectations for which it was created. Last but not least, constant testing ensures that the software and the integration are done transparently and with quality, preventing it from damaging what has already been created [11].

Thus, what is recommended to be able to implement DevOps is that all people should use the same tools to be able to achieve that all parties can have the same information that they have the same data since this helps or collaborates so that they can work in the same line, have visibility in the fulfillment of the objectives and make decisions with accurate and updated data. However, many times it is not possible to do it that way; that is, it is too late to use the same tools; for these cases, it is best to try to make a mix of all those that already exist with the use of components or the service of open-source interfaces [12].

In the market, several tools can be used to implement DevOps, which every day tries to integrate improvements to provide better control or collaboration with different areas of the organization. Some of them come from the technological giants that have incursions into solutions that help adopt the DevOps culture. Among the tools or solution providers are: Microsoft's Team Foundation Server tool, Atlassian's Jira Software solution, Amazon Web Services (AWS), IBM, Intel, and Google; open-source tools also emerge, which meet the objectives of being able to provide a collaborative solution [12].

Microsoft's Team Foundation Server (TFS) is a platform that can execute a vast number of functions, which allows interdisciplinary teams to integrate their work efficiently, and the size of the project does not impede since it is possible to work on any project regardless of its size [13].

One of the features of the TFS tool is that it can be used with many programming languages, e.g., Java, Python, Hyper Text Multi-Language release 5 (HTML 5), JavaScript, and C#, among others. This helps many organizations with some of these tools to be fine if they want to use them. Also, it can be used with Visual Studio, Eclipse, and xCode tools, plus it allows integration into any code editor (IDE). Therefore, it is not a tool with integration limitations since it has been improving so it can be used transparently [13].

Another use that the TFS tool has is for controlling code versions. In addition, it has unlimited capacity; it is private (permissions manage it to each repository), secure, and centralized [14]. With this feature, multiple people can work on the same version in different parts of the software, which helps each team member to upload their work, and others can get it efficiently by simply pressing the option to get the latest version. If two people have worked on the same component, the program prompts you to check if you want to merge the two jobs or decide which one to leave.

Teams using agile methodologies can use TFS since this set of tools can implement Kanban panels, in which the progress of each of the jobs can be seen, ensuring that all members of the updated group can see the flow and stay connected [15]. Another option offered is the Scrum dashboard, with which the team can conduct planning, daily, and retrospective meetings very efficiently. In addition, all users can see the code that is linked to each of the stories, in which each of the changes can be visualized, the errors that it presents, and the history of the evolution remains so that it can be tracked in case it is necessary [15].

Added to this, TFS collaborates with the integration and delivery of software products continuously; software can be deployed from anywhere and can be integrated at any time since it can work in the cloud. For this purpose, load testing can be performed, which allows testing of the infrastructure in place and the number of loads to be performed [15]. Integration with TFS can be done towards third parties, either applications or services, using open standards; some of the Application Program Interfaces (APIs) mentioned are REST and OAuth 2.0 [16].

Also, Microsoft offers the possibility to have an express version for free for users who use it individually or for small teams with less than five members. No server is needed for this version; you can take the stored history if you want to migrate to another paid version. So, having commented on the set of TFS tools and their features, this paper will analyze how to use them to implement the DevOps culture in organizations.

Methodology

This research has a qualitative approach because it aims to explore a theory and then turn to the empirical world to confirm if it is supported by the facts [16]. This is a case study review since it was based on compiling and discarding what is not necessary and reviewing the references of other works done to provide information on the terms used [17]. These development methodologies are currently employed; in any case, it is essential that the method used is clear and rigorous to guarantee the reliability and validity of results, in addition to the search for the tools that are exposed in this research [18-20].

In terms of scope, this article covered a descriptive approach to the characteristics of Scrum, XP methodologies, DevOps culture, and the functions of the TFS tool. Finally, we proceeded to analyze how DevOps can be implemented in organizations with the help of the tool.

Results and discussion

The cycles performed in agile methodologies seek the delivery of potentially usable products, which means that they can be placed in production environments so that the end user can use them; of course, for this to happen, it must first be taken into account that the software has successfully passed all phases, including being tested promptly so that it would go to the operations area for its implementation field [5, 21].

Thus, to achieve that, usable products are generated quickly in agile methodologies; for example, Scrum works with several ceremonies, which streamline processes. In addition, it gives the possibility to ask for new requirements or make changes to the needs that are allowed without causing significant problems [10].

Among the ceremonies implemented in Scrum is the product stack, which is the customer requirements; the customer prioritizes them and can change that when the business merits it. This list is not definitive and can constantly change [8]. With this list, meetings are held to plan each Sprint to be worked on, in which the tasks that can be performed according to the team's capacity and the time defined, which can be from 2 to 4 weeks, are listed. At the end of the Sprints, a retrospective must be held, in which aspects that can be improved are sought. Daily the Scrum team conducts follow-up meetings of the activities, in which they see what they did yesterday, what they will do today, and finally if they had any difficulties or problems [10].

The requirements are presented in a tool that must be updated according to work performed, and if priorities change, everyone must be aware of such changes; this list is called a product backlog.

In organizations where many disciplinary groups can make quick deliveries of products to the operations area, this causes bottlenecks since they will need more time to meet all requests. This results in customers not being able to use the deliverables once they have been developed, which is of no benefit to the customers, much less to the business in general, but instead causes losses and pressure on the different areas.

The main idea of DevOps is to reduce the time in the processes or software development cycles so that end users can get the product of value as soon as possible so that it can be used for the benefit of the business and they can get their advantages in the earliest way [22]. When the customer receives the software in production, ready to be used, he can obtain benefits since he has tools that help him to perform his work in a better way; even in some cases, he can measure his performance with the data that is being obtained, he can see which one or which of his processes can be improved, and try to implement a strategy to achieve it. There are many reasons why a business needs to have all its assets working, as in the case of software, which is of no benefit if it is only in the queue to be implemented.

DevOps cycles change from other bikes to the extent that their duration changes; this means that all processes done manually can be automated, lowering their duration time significantly [23]. Therefore, the stages that must follow their products, such as planning the product to be made, generating the code, testing the code, releasing it, implementing it, operating it, and monitoring it, and what changes with DevOps, is to do this in an agile way, and constantly. It is done repeatedly, and when the cycle is finished, it starts again, trying to improve the duration of the processes in practice.

This is where DevOps cycles come in, which seek to ensure that the entire process from system development to production is carried out quickly. This, with the collaboration of both the people who are in development and the people who are in operations, where the communication channel can be used to achieve this, with regular meetings, where people are aware of all possible changes that can be implemented and what aspects must be taken into account to avoid problems.

One of the processes that can be improved with the implementation of DevOps is the use of Continuous Integration (CI), which is the agility to add more code to the solution or modify it when a corresponding change request has been made. When a code is generated, it can be deposited in what is known as version control, where you can have several versions, in which each contemplates the changes or improvements separated securely and where they can be

backed up. The idea is that each person in the project can generate their code in isolation. Once they finish their development, they can integrate it into what is known as the complete main branch, where the already integrated and tested code of the whole team is [24].

Before, this was extremely difficult to do since everyone worked on their code locally. Trying to unite it after several weeks, with all the advances of each one, was a real headache since myriad problems arose. For this reason, using version control can avoid these problems and help reduce development times since it is automated.

Before, this was extremely difficult to do since everyone worked on their code locally. Trying to unite it after several weeks, with all the advances of each one, was a real headache since endless problems arose. For this reason, using version control can avoid these problems and help reduce development times since it is automated.

Another practice that can be used for DevOps is Continuous Delivery (CD), which is the entire process used from creating or constructing the software until it is taken to production. Now, to have control of this process, it is necessary to have approval in the passage of each of the stages of the process so that they can be easily auditable and comply with the methods already defined in the organizations as regulatory. If this process is done manually, it will cause errors and delays in the delivery of the products. As for the validation performed in this process, the tests with the highest probability of failure are implemented first; of course, automated tests can be contemplated for this to be agile. After the most probable tests have been performed and completed, longer and more complex tests can be exercised [25].

Several tests must be performed depending on the business needs and not all of them can be performed automatically; there are some that, due to their process, need a pair of eyes to check their proper functioning. The CD process contemplates building, testing, and deploying what is being worked on in a production environment. Then, to move on to the other stages, these must be completed correctly to move on to the next one, to take the work to production with the least number of errors.

Here also enters the agile planning which is the use of frameworks to produce the codes or deliverables faster, with the support of agile methodologies, which accelerate product delivery, where the team works towards the project objectives. All have the same responsibilities to achieve the planned goals [26].

Monitoring or registering running applications is constantly reviewing the performance of the developments that reached production to verify that they are running according to expectations. This is because the DevOps experience does not end when the requirement is put into production but continues with the verification of the products at all times since, depending on the use given by the users, they can check if the application is responding as desired. In the event of errors or any problems, these are detected immediately and are treated so that the user experience is not harmed. Then the root of the problem is sought to find the solution and prevent it from happening again [27].

Another aspect of good practices that should be implemented with DevOps is the application of tests, which can be manual, where you can use a human resource or several, or automated tests that are performed with the help of a robot that performs the number of times necessary to complete them successfully, these tests can be a black box or white box [10].

Communication and feedback are fundamental in the DevOps culture since they must exist between people in development and those in operations. This is to avoid future conflicts or different configurations between the versions used by the test or development environments and the version to be implemented in the production [28]. What is proposed are periodic meetings so that the operations people can give more feedback on what they know about the business,

talk about what is being worked on, and work hand in hand with both areas. Both areas should know about DevOps to understand that barriers between both departments should not exist. You can even evaluate processes between products and other issues that help ensure that what you develop meets the business's and customers' expectations.

DevOps is not a role or a position; it is a culture and good practices, so it cannot be said that you need to create functions to implement it. However, to be part of this new way of working, the person must have some interpersonal skills or techniques, in addition to possessing knowledge of the organization's business processes, operational practices and software issues, and infrastructure with which the business has [27].

In some articles, it is mentioned that the person who should be in charge of leading DevOps strategies is the Chief Information Officer (CIO); if this is to be carried out satisfactorily since his sponsorship is needed, the changes are lasting and are taken by all as a practice, it would also collaborate between the different teams. With this, what is sought is that all stakeholders are involved, which would help facilitate agile management in the demand of requests for the development team [28].

Currently, several tools in the market collaborate to implement DevOps, but as mentioned above, this research will focus on using the Team Foundation Server (TFS) tool. The application that Microsoft will use to implement TFS is Visual Studio. It can be created in several platforms such as Visual Basic, Visual F#, Visual C#, Visual C++, ASP.Net, and JavaScript; it can also be used online.

To configure TFS in Visual Studio, you must have a server that has TFS configured; this is in case you will use more than five users. In the case of fewer than six people, Microsoft gives the option to use a shared server, and when you want to move to a private server, you can do it by migrating the information that has already been worked on. Well, entering the server information is done straightforwardly.

So, to download the projects, you must wait since it will last according to the number of projects you want to connect to and the amount of information stored for each project. With TFS, it is possible to manage agile projects since it is possible to create requirements and, from each of them, complete tasks assigned to each work team member. Thus, the status and changes that are being executed are tracked with the help of the tool's dashboard. For this purpose, TFS has a Dashboard with a "Backlog" to work on each Scrum team iteration. The tasks are ordered according to priorities, and assigning that task to an owner is also available. Each person can allocate the time or effort they deem appropriate to finish the job [29].

With TFS, one can have version control since the project is stored on a server, and everyone can download the code and documents generated over time. There are two ways of working: one is online or connected to the server where the application is configured; the other way is when there are network problems, and the connection to the server cannot be made, or when other cases arise that prevent such contact, it is possible to work locally [29]. For the first option of working with connection, it is possible to see if someone else is working on the files to be worked on, or if not, if they are free.

TFS provides the necessary information to see if two or more people are working on the duplicate files, and if so, you can merge the different jobs or decide which version to keep for uploading. Also, the application offers the option of consulting the change history, which shows the change made to the file, the user who made the change, and the date the change was made.

When it wants to release new products inside the project, the ideal is to make a Branch of the project so that you can have the previous version in the same form that you have, for example, in production, and work on another version with the changes or improvements that request personal information from the user according to the needs of the business. With this branch, the history of changes made to each file is preserved [30].

In this Branch creation option, it is possible to work in different ways. For example, you can have the main branch, which is the complete work or what has been done so far, and the need arises to create two new changes, which would do it for two different resources, in which case each one would have its branch. Then, when each one finishes its work, these can be joined to a new Branch named "Development" to see if there are conflicts and so on in the union; the cases that arise are worked on, and once they are ready, the tests are applied. Once completed, they would form a new version of the project [30]. These are some of the facilities provided by using the application.

When a file is being edited in the solution explorer, it is shown if it is being modified with the check symbol ✓; in case a new file has been added, it is displayed with the plus sign +; also, in case it has not been touched it is shown with the padlock icon. Also, when another person works on a file, it informs with the user icon. It can be configured to display deleted files; these would be shown with a red X. With all these symbols or icons, you can see how the TFS tries to inform about the activities being done in each of the files the project has.

In the Team Explorer tab, as shown in Figure 1, you can see what is pending. This means that the files that have been modified or added will be displayed. This should be done with the Check-In option when you want to upload a file. Still, to control that only what is ready is uploaded, you can see that TFS separates the things to be uploaded in the Included Changes section, and the files left out will be in the Excluded Changes option. In addition, it also shows the number of files that are in each of the areas [31]. To upload the changes, it is recommended that in the Comment section, you write down what was done in the file or files so that in the history, you can summarize what was done in that change.

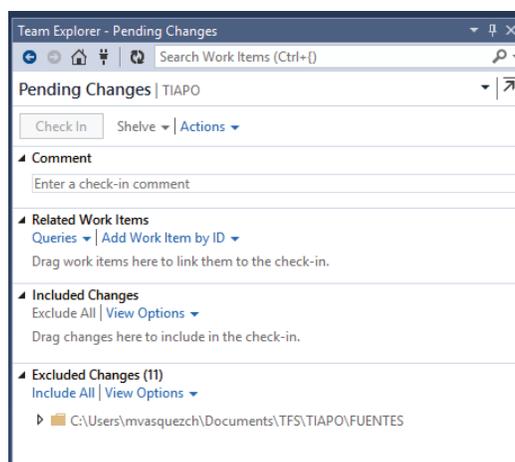


Figure 1. Pending changes Team Foundation Server.

So, TFS also gives the option to see what was done in each of the files with the compare function since it can see the differences in two files, even if they are the differences that are in the local file, with the one on the server [32].

For the execution of the tests, Microsoft has created the IntelliTest component, which facilitates the application of white box tests, which is configured in Visual Studio, and tests can be applied to the method that you want to use; it also facilitates the solution because it shows a detail of the error. To execute the tests, it is positioned in the method, given right click on the way that you want to test in the option, and finally, given a chance to execute. It is executed several times with different inputs when this option is pressed, showing which values were entered and the results. Also, you can test an entire class the same way the method is positioned over the type and repeat the same action. This functionality also allows storing the executed tests in a separate project [32].

Conclusions

The emergence of agile development methodologies for IT projects has achieved its goal of creating usable software products in short periods, with the flexibility that the requirements can be easily changed and can change their priorities at any time, ending the roles in the development area, since it manages to unify the responsibility for the entire team.

This acceleration in the development area has caused stagnation in the operations area, which has received more passes to production in short periods. DevOps is a strategy that seeks to reduce user product delivery times, collaborating with the development and operations areas without neglecting the business and all parties involved. Thus, it aims to create a culture in the organization where cooperation, communication, and feedback are the allies so that they can have a better time developing products and achieving competitive advantage and satisfaction of customers or end users.

In this sense, to collaborate with this change of culture, it is essential to have the support of trained leaders, who support and give sponsorship to the new way of working, where all areas of the company can be integrated.

The use of tools is a perfect strategy to reduce the time between the stages of product creation, as is the case of the TFS application, which can be implemented in various programming languages, which is a great advantage since it can be integrated into the software of many companies that already have their software created.

TFS is a potent tool in which you can work with version control in isolation, and when you have the finished requirement, you can easily unify the project. It can work by versions where the histories are saved, and the tests can be done before joining it to the main branch. In addition, it is possible to reduce the time for the continuous delivery of products.

The implementation of DevOps is a change in the way of working since it encourages teamwork, which avoids the barriers between departments so that they can work hand in hand to achieve benefits in having functional software that can take advantage of the end users.

Finally, to implement DevOps, it is necessary to understand that, even if you have the best tools at your disposal, if you do not have the culture, you will not achieve better results since it is a combination of all the best practices to be able to work. In addition, it is a change that always continues because you must always be aware of continuous improvements consistently to achieve improvements in processes and products. The evolution of DevOps in business is a new frontier in creativity and teamwork, playing together to build a more competitive organization.

For future lines of research, it is proposed to review the existence of success stories with the implementation of DevOps using the TFS tool in Costa Rica or any Latin American country to apply interviews about the experience they have had with its performance with this tool, also

how it has changed the culture of the organization, to know which are the people responsible for ensuring compliance with the change of the organization and how success is measured in the organization with the use of these good practices.

Additionally, it is recommended to study the new trends in the market related to the DevOps paradigm and the focus on reducing software development cycle times to obtain products that can be used in short periods to satisfy the needs of the business.

References

- [1] O. Salo and P. Abrahamsson, "Agile methods in European embedded software development organizations: a survey on the actual use and usefulness of Extreme Programming and Scrum," *IET software*, vol. 2, no. 1, pp. 58-64, 2008, doi: <https://doi.org/10.54489/ijtim.v2i2.77>.
- [2] M. S. Khan, A. W. Khan, F. Khan, M. A. Khan, and T. K. Whangbo, "Critical challenges to adopt DevOps culture in software organizations: A systematic review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14339-14349, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145970>.
- [3] M. Gall and F. Pigni, "Taking DevOps mainstream: a critical review and conceptual framework," *European Journal of Information Systems*, vol. 31, no. 5, pp. 548-567, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/0960085X.2021.1997100>.
- [4] P. Dora. "State of DevOps Report." Puppet. <http://www.berrykersten.nl/wp-content/uploads/2017-state-of-devops-report.pdf> (accessed 2022).
- [5] M. Senapathi, J. Buchan, and H. Osman, "DevOps capabilities, practices, and challenges: Insights from a case study," in *Proceedings of the 22nd International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering 2018*, 2018, pp. 57-67, doi: <https://doi.org/10.1145/3210459.3210465>.
- [6] Microsoft. "DevOps overview for VSTS and TFS." Microsoft. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/devops/user-guide/devops-alm-overview?view=azure-devops> (accessed 2022).
- [7] T. Dingsøyr, S. Nerur, V. Balijepally, and N. B. Moe, "A decade of agile methodologies: Towards explaining agile software development," vol. 85, no. 6, pp. 1213-1221, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.02.033>.
- [8] A. Menzinsky, G. López, and J. Palacio. "Scrum Manager v2.6." Scrum Manager. https://www.academia.edu/30510102/Scrum_Manager_v_2_6 (accessed 2022).
- [9] F. Anwer, M. Aftab, and S. Syed, "Comparative analysis of two popular agile process models: Extreme Programming and Scrum," *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, vol. 8, no. 2, 2017. [Online]. Available: https://www.ijcst.org/Volume8/Issue2/p1_8_2.pdf.
- [10] M. D. Kahya and Ç. Seneler, "Geographical distance challenges in distributed agile software development: Case study of a global company," in *2018 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, 2018: IEEE, pp. 78-83, doi: <https://doi.org/10.1109/UBMK.2018.8566591>.
- [11] R. Jabbari, N. bin Ali, K. Petersen, and B. Tanveer, "What is DevOps? A systematic mapping study on definitions and practices," in *Proceedings of the scientific workshop proceedings of XP2016*, 2016, pp. 1-11, doi: <https://doi.org/10.1145/2962695.2962707>.
- [12] H. Admin. "Tooling up for DevOps." HDWebsoft. <https://www.hdwebsoft.com/blog/tooling-up-for-devops.html> (accessed 2022).
- [13] S. Neely and S. Stolt, "Continuous delivery? easy! just change everything (well, maybe it is not that easy)," *2013 Agile Conference*, pp. 121-128, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/AGILE.2013.17>.
- [14] F. Medina-Domínguez, M.-I. Sanchez-Segura, A. Amescua, and J. García, "Extending Microsoft team foundation server architecture to support collaborative product patterns," *Software Process Dynamics and Agility: International Conference on Software Process, ICSP 2007, Minneapolis, MN, USA, May 19-20, 2007. Proceedings*, pp. 1-11, 2007, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-72426-1_1.
- [15] G. Azizyan, M. K. Magarian, and M. Kajko-Matsson, "Survey of agile tool usage and needs," *2011 Agile Conference*, pp. 29-38, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/AGILE.2011.30>.
- [16] J. Ofoeda, R. Boateng, and J. Effah, "Application programming interface (API) research: A review of the past to inform the future," *International Journal of Enterprise Information Systems (IJEIS)*, vol. 15, no. 3, pp. 76-95, 2019, doi: <https://doi.org/10.4018/IJEIS.2019070105>.
- [17] J. C. Greene, J. L. Compton, E. Whitmore, and H. Sappington, "Strategies for qualitative data analysis," *Evaluation Practice*, vol. 8, no. 4, pp. 5-11, 1987, doi: <https://doi.org/10.1177/109821408700800401>.

- [18] A. Queirós, D. Faria, and F. Almeida, "Strengths and limitations of qualitative and quantitative research methods," *European Journal of Education Studies*, 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.46827/ejes.v0i0.1017>.
- [19] A. Shah, G. Piro, L. Grieco, and G. Boggia, "A qualitative cross-comparison of emerging technologies for software-defined systems," in *2019 Sixth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, 2019: IEEE, pp. 138-145, doi: <https://doi.org/10.1109/SDS.2019.8768566>.
- [20] H. Taherdoost, "What are different research approaches? Comprehensive review of qualitative, quantitative, and mixed method research, their applications, types, and limitations," *Journal of Management Science & Engineering Research*, vol. 5, no. 1, pp. 53-63, 2022, doi: <https://doi.org/10.30564/jmser.v5i1.4538>.
- [21] L. E. Lwakatare *et al.*, "DevOps in practice: A multiple case study of five companies," *Information and Software Technology*, vol. 114, pp. 217-230, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2019.06.010>.
- [22] W. de Kort, "What Is DevOps?," *DevOps on the Microsoft Stack*, pp. 3-8, 2016, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1446-6_1.
- [23] L. Zhu, L. Bass, and G. Champlin-Scharff, "DevOps and its practices," *IEEE Software*, vol. 33, no. 3, pp. 32-34, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/MS.2016.81>.
- [24] M. Shahin, M. A. Babar, and L. Zhu, "Continuous integration, delivery and deployment: a systematic review on approaches, tools, challenges and practices," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3909-3943, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685629>.
- [25] L. Chen, "Continuous delivery: overcoming adoption challenges," *Journal of Systems and Software*, vol. 128, pp. 72-86, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2017.02.013>.
- [26] P. Gould, "What is agility?," *Manufacturing Engineer*, vol. 76, no. 1, pp. 28-31, 1997, doi: <https://doi.org/10.1049/me:19970113>.
- [27] T. Schlossnagle, "Monitoring in a DevOps world," *Communications of the ACM*, vol. 61, no. 3, pp. 58-61, 2018, doi: <https://doi.org/10.1145/3168505>.
- [28] C. Jones, "A proposal for integrating DevOps into software engineering curricula," in *Software Engineering Aspects of Continuous Development and New Paradigms of Software Production and Deployment: First International Workshop, DEVOPS 2018, Chateau de Villebrumier, France, March 5-6, 2018, Revised Selected Papers 1*, 2019: Springer, pp. 33-47, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-06019-0_3.
- [29] W. De Kort, *DevOps on the Microsoft Stack*. Springer, 2016.
- [30] J. Palermo, ".NET DevOps for Azure," *Apress Berkeley, CA*, vol. XVII, p. 272, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5343-4>.
- [31] J. Levinson and D. Nelson, "Team Foundation Version Control," *Pro Visual Studio 2005 Team System*, pp. 59-102, 2006, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0171-7_3.
- [32] D. Ivanov *et al.*, "UnitTestBot: Automated unit test generation for C code in integrated development environments," *2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings (ICSE-Companion)*, pp. 380-384, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSE-Companion58688.2023.00107>.

Huella hídrica en el proceso constructivo como indicador de sostenibilidad: un estudio de caso para Costa Rica

Water footprint in the construction process as an indicator of sustainability: a case study for Costa Rica

Alejandro Mora-González¹, Nidia Cruz-Zúñiga²

Fecha de recepción: 28 de mayo, 2023

Fecha de aprobación: 6 de octubre, 2023

Mora-González, A; Cruz-Zúñiga, N. Huella hídrica en el proceso constructivo como indicador de sostenibilidad: un estudio de caso para Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 36-48.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6684>

1 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: alejandromoragonzalez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0006-0143-9578>

2 Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: nidia.cruz@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4416-0626>

Palabras clave

Huella hídrica; declaración ambiental de producto; consumo de agua en procesos de construcción; construcción sostenible.

Resumen

El objetivo principal de la investigación fue determinar la factibilidad de utilizar la Huella Hídrica (HH) como indicador ambiental en el sector constructivo, para lo cual se realizó una cuantificación en campo de este indicador en cuatro proyectos residenciales de vivienda unifamiliar seleccionados en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, viendo la construcción como un proceso productivo, y analizando los resultados por actividad y de forma global. Se calculó la huella azul directa en el proceso constructivo mediante mediciones en campo, realizando inspecciones semanales a cada proyecto, así se asignó un consumo de agua por actividad según el avance que se observó. Se estimó la huella hídrica indirecta (azul y verde) para los materiales, basándose en una serie de datos de uso de agua en la producción, consultados de las declaraciones ambientales disponibles de cada producto. Debido a la falta de datos disponibles en el contexto nacional, no se pudo estimar la HH gris. Se concluye que los resultados obtenidos podrían ser considerados como un primer avance del cálculo de la HH en la construcción. Para lograr un estándar a nivel nacional se requiere incentivar a los productores locales o importadores a desarrollar declaraciones ambientales de producto de los materiales de construcción y así generar una base de datos robusta sobre el consumo de agua en el proceso productivo de estos. Además, se requiere mejorar las prácticas de uso directo del agua en la construcción y la cuantificación del consumo como indicador de eficiencia de potenciales ahorros de agua.

Keywords

Water footprint; environmental product declaration; water consumption in construction processes; sustainable construction.

Abstract

The main objective of the research was to determine the feasibility of using the Water Footprint (WF) as an environmental indicator in the construction sector, for which a field quantification of this indicator was carried out in four selected single-family housing residential projects in the Greater Area Metropolitana de Costa Rica, seeing construction as a productive process, and analyzing the results by activity and globally. The direct blue footprint in the construction process was calculated through field measurements, carrying out weekly inspections of each project, thus assigning a water consumption per activity according to the progress that was observed. The indirect water footprint (blue and green) for the materials was estimated, based on a series of data on the use of water in production, consulted from the available environmental declarations of each product. Due to the lack of data available in the national context, gray HH could not be estimated. It is concluded that the results obtained could be considered as a first advance in the calculation of HH in the construction industry. To achieve a standard at the national level, it is necessary to encourage local producers or importers to develop environmental product declarations for construction materials and thus generate a robust database on water consumption in their production process. In addition, it is necessary to improve the practices of direct use of water in construction and the quantification of consumption as an indicator of efficiency in potential water savings.

Introducción

Según el Informe Estado de la Nación, en Costa Rica se aprovecha eficazmente el recurso hídrico, pero no se logran controlar los impactos negativos de su uso intensivo en distintos sectores de la industria productiva [1]. Según la norma INTE C171:2016, en Costa Rica el consumo de agua per cápita es de 1490 metros cúbicos anuales [2]; este valor se encuentra por encima del promedio mundial, el cual es de 1385 metros cúbicos por año [3], lo que demuestra que en Costa Rica se hace un uso excesivo del recurso. Para lograr un desarrollo sostenible a nivel país, se debe realizar un esfuerzo para disminuir el consumo de agua en todos los campos, incluido la construcción.

En este contexto, el sector de la construcción tiene un papel importante; ya que es responsable del 16 % del consumo mundial de agua [4]. En el país se han realizado esfuerzos para fomentar las buenas prácticas de consumo de este y otros recursos; por ejemplo, el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (CFIA), bajo el Programa Bandera Azul Ecológica (PBAE), creó una categoría exclusiva para construcción sostenible, donde uno de los objetivos es implementar medidas que permitan gestionar el consumo de agua, desde el proceso de diseño hasta la fase constructiva de las obras [5]. Asimismo, la Cámara Costarricense de la Construcción (CCC) mediante la guía de construcción sostenible, habla de la conservación del agua y eficiencia de su uso durante la operación de la edificación [6].

Pese a lo anterior, no existen suficientes estudios que den una idea de la magnitud del consumo de agua en la construcción en el país. Por esta razón, la presente investigación contribuye a la generación de conocimiento en la cuantificación del volumen de agua que se consume en el proceso productivo de proyectos constructivos, iniciando con el tipo de obra más común en el país: vivienda unifamiliar.

A nivel nacional, existe una metodología no oficial, recientemente estudiada, para el control y análisis del consumo de agua durante la fase constructiva de obra gris [7]. Esta metodología se aplicó en dos proyectos de construcción en modalidad vertical durante su fase de obra gris y se obtuvo resultados de consumos de agua mensuales, según el porcentaje de avance de la obra gris y por nivel. Sin embargo; esta cuantificación no contempla el consumo de agua en toda la cadena de producción, dejando de lado un gran volumen de agua por estimar debido al proceso productivo de los materiales, entre otros.

La evaluación de la sostenibilidad del consumo de agua en la construcción a través de un indicador como la huella hídrica resulta prometedora para afrontar los retos de la gestión integrada del recurso hídrico y aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Una de las metas del ODS 6 menciona que, para el año 2030, se busca aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua [8]. Debido a que el sector de la construcción es uno de los más importantes en la industria del país, es crucial efficientizar el consumo de agua en los procesos constructivos para contribuir a dicha meta. Aunado con ello, las metas del ODS 12 también enmarcan acciones en pro del uso eficiente de agua, con las que se busca lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales en general. Para lograrlo, se debe mejorar el consumo del recurso hídrico en todas las actividades productivas [9].

La sostenibilidad de la huella hídrica puede ser considerada desde una serie de puntos de vista diferentes, el más común es el geográfico, donde se debe analizar si la huella hídrica total dentro de una determinada área, que normalmente se limita a una cuenca hidrográfica. Para este primer caso, la huella no sería sostenible cuando; por ejemplo, el caudal mínimo ecológico o las normas de calidad ambiental en una zona de captación se ven afectados; o cuando, la asignación de agua en la zona de captación sea injusta o ineficiente [10]. El segundo es desde

el punto de vista de un proceso productivo, en cuyo caso la sostenibilidad de la HH depende de dos criterios: el primero de ellos sería que no es sostenible cuando dicho proceso se sitúa en un período específico del año en una zona de captación o cuenca específica, donde la huella hídrica total no es sostenible; o cuando no sea sostenible en sí misma (independientemente del contexto geográfico) cuando las huellas hídricas verde, azul o gris del proceso puedan reducirse o evitarse completamente con un coste social y económico aceptable [10]. Viendo la construcción como un producto, el flujo ideal para conseguir una HH sostenible se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

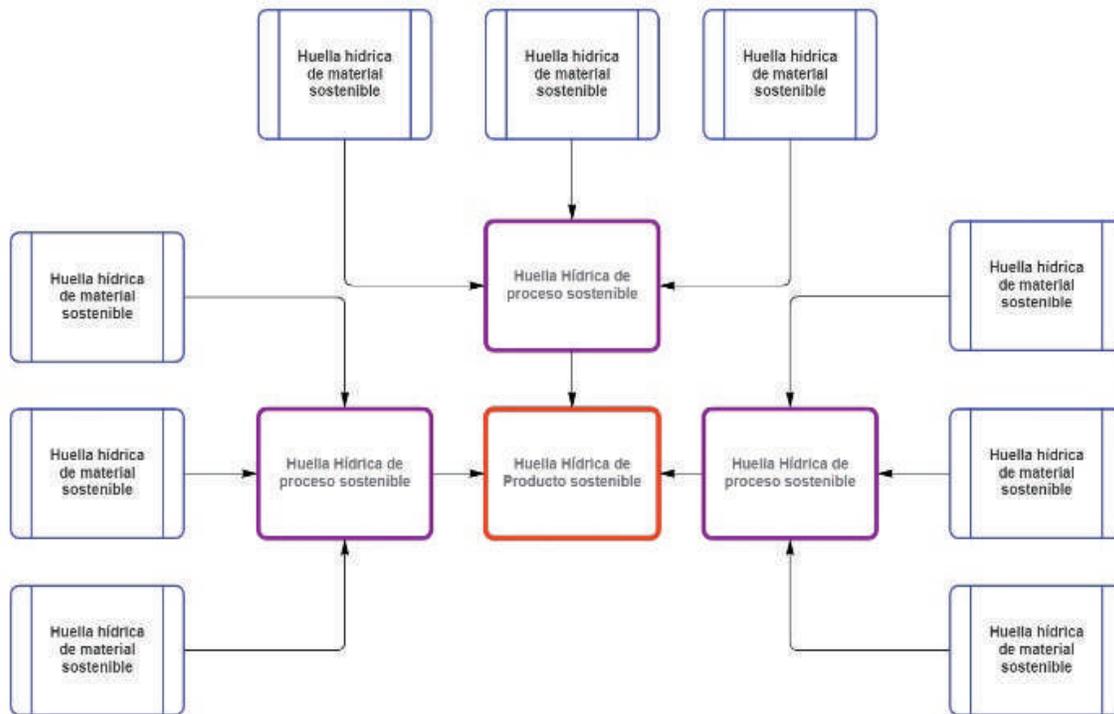


Figura 1. Esquema huella sostenible.

Dicho esto, la investigación plantea como hipótesis de trabajo que la huella hídrica directa e indirecta puede resultar un buen indicador de sostenibilidad en el consumo del recurso hídrico en la construcción, más si se registra por metro cuadrado construido; ya que esto permitiría un proceso más simple de comparación entre las obras.

Metodología

El proyecto se desarrolló en cuatro etapas. En la primera etapa una revisión bibliográfica amplia referente a la HH, la construcción sostenible y la teoría de la producción más limpia. Esta información se utilizó como pilar para establecer en fin de la investigación y luego comparar los resultados que se iban obteniendo en el proceso. En la segunda etapa se procedió a la selección de los proyectos a incluir en la investigación, para los que se verificó que cumplan con los criterios previamente definidos, entre los cuales están que fuera una vivienda unifamiliar estándar (no de lujo ni de interés social), que estuviera en la GAM, que no fuera parte de una construcción de casas en serie o condominios, que contara con medidor en la paja de agua. Luego se realizó una breve entrevista al encargado del proyecto con el fin de determinar el nivel de conocimiento del tema; ya que, esto afecta directamente en la investigación, y se realizó una visita de reconocimiento al lugar antes de que se iniciarán cada una de las obras. La tercera etapa correspondió a la recopilación de datos en campo para cálculo de la HH.

Para ello, la cuantificación en cada proyecto inició el día en el que se colocan los medidores de agua. La suma de los consumos semanales, medidos en el hidrómetro, corresponden a la HH azul directa del proyecto. Luego de esto se realizó una visita semanal a cada uno con el objetivo de registrar la lectura de la cantidad de agua que se ha consumido en el proceso constructivo. La visita se aprovechó para observar el avance de la obra, cuantificar la cantidad de materiales que han sido incluidos en el proyecto y documentar las prácticas de consumo del recurso hídrico. Finalmente, la cuarta etapa consistió en el cálculo de la HH, el análisis de resultados y el comparativo entre proyectos. La HH indirecta se estimó dependiendo de los materiales utilizados en la obra, para lo que se utilizaron datos de declaraciones ambientales de producto (EPD). Si el material utilizado no posee una EPD, se utilizó una de un material similar hasta donde fue posible encontrar datos. De las EPD se obtuvieron datos de huella azul y huella verde por unidad de material en la construcción y se creó una base de datos de huella hídrica azul y verde para materiales típicos. Aplicando estos factores a los materiales consumidos se pudo estimar una HH indirecta para cada proyecto. A la HH indirecta se le suma el valor de HH azul directa para obtener el valor de HH parcial estimada y se calculó una tasa de consumo de agua por metro cuadrado de construcción para utilizarse como indicador global para el sector de construcción.

Dentro de las limitaciones de la presente investigación está el que no se contempló medir como influye la variante mano de obra en la utilización del recurso hídrico, a pesar de que en campo si se evidenció que esta variable puede ser muy significativa. Por otro lado, debido a la falta de datos disponibles en el contexto nacional, no se pudo estimar la HH gris de los proyectos y por esta razón no se puede tener el dato de huella hídrica total. Finalmente, se aclara que la HH por acarreo de materiales desde los puntos de venta hasta el sitio de proyecto queda fuera del alcance de la investigación.

Dentro de las estimaciones también se contempló el consumo de energía y su impacto en la HH, para ello cada proyecto debe tener un medidor de energía con el fin de cuantificar el consumo en la construcción y asociarle la HH respectiva. Semanalmente se realizó una medición de este parámetro y se contempló la matriz energética del país. Dado que el 67.50% de la energía producida en Costa Rica es hidroeléctrica se debe considerar una HH asociada a la evaporación en las presas. Para estimar este aporte el dato del total de energía utilizado en el proyecto se multiplica por el porcentaje de energía hidroeléctrica y luego por el factor de HH azul.

Para el cálculo de la HH indirecta de cada proyecto, es necesario contar con la lista de materiales utilizados en cada obra, lo más detallada posible. En esta lista se debe reportar claramente las cantidades y las unidades de medición de cada material. En el apéndice se muestra una tabla resumen con los datos más relevantes utilizados para estimar la huella hídrica de cada material; estos datos fueron recopilados de diversas fuentes.

Por otro lado, con el objetivo de cuantificar la huella hídrica asociada al combustible utilizado en la obra se estableció un registro del equipo empleado en el proyecto y el tiempo que este se utilizó. Se consideró que el equipo típico que utiliza combustible en las construcciones de vivienda unifamiliar es una retroexcavadora, vagonetas, mezcladora de concreto y bomba de concreto. En campo se verificó la utilización de esta maquinaria y se estimó un registro de horas de uso.

Resultados

Huella hídrica azul directa en la obra

Comparando los datos de HH azul directa obtenidos en las visitas semanales a los cuatro proyectos se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 2. Las series de datos poseen una tendencia lineal con el intercepto en 0. El coeficiente de determinación en las

series está cerca de 1; lo que indica que el ajuste de las series de datos con las líneas de tendencia es adecuado. Además de eso, la constante en la ecuación que describe la línea de tendencia es similar en todos los proyectos. Se podrían utilizar las ecuaciones para estimar la huella hídrica azul directa de un proyecto constructivo de vivienda unifamiliar dependiendo de su duración en semanas; sin embargo, se requiere más estudios de este tipo para generar una base de datos suficientemente robusta para realizar estimaciones que reflejen la realidad de los proyectos constructivos con suficiente precisión. Los resultados parecen reflejar una tendencia lineal creciente entre el tiempo transcurrido y el consumo acumulado del agua, lo que podría indicar que sin importar el tipo de actividades constructivas que se estén llevando a cabo, el consumo parece tener pocas variaciones, lo cual podría ser un indicativo de que no se aplican medidas de ahorro de consumo en las actividades que demandan poca cantidad de agua. Con las visitas de campo se pudo detectar que esto podría deberse a costumbres de las personas en obra: mantener mangueras abiertas, reservorios siempre llenándose y en ocasiones desbordándose, limpieza utilizando solo agua en vez de barrer en seco, entre otros.

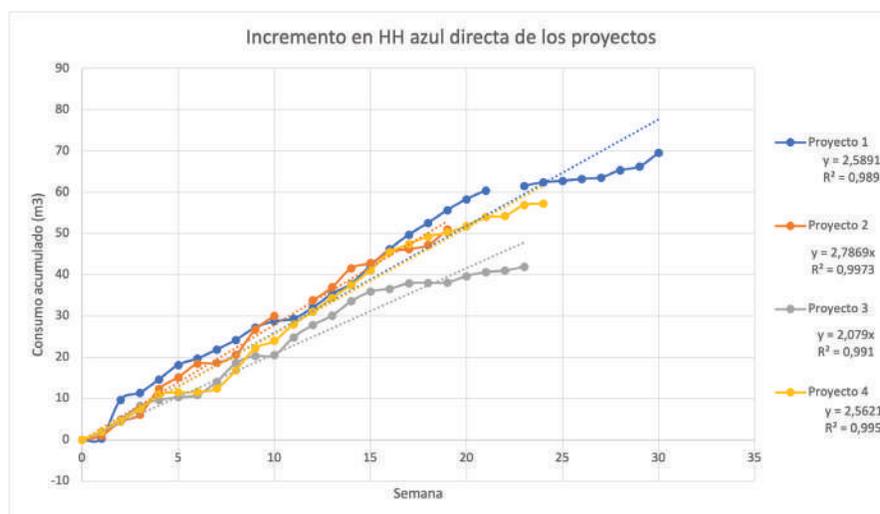


Figura 2. Huella hídrica azul directa de los proyectos.

Promediando los resultados de las cuatro series de datos obtenidas se obtiene la siguiente ecuación:

$$HH \text{ azul directa} = 2.50 T \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde T = periodo de duración del proyecto en semanas

Esta ecuación podría considerarse como un primer avance para estimar la HH directa en proyectos de construcción similares a los estudiados.

Huella hídrica azul y verde indirectas por materiales

En el cuadro 1 se muestra el valor de HH azul y verde indirecta asociado a los materiales utilizados en los cuatro proyectos. En dicho cuadro se puede observar que la utilización del PVC y materiales ferrosos como la varilla y malla electrosoldada poseen un fuerte impacto en el aumento de la HH azul directa. Adicionalmente, las maderas de formaleta tienen un factor alto de HH verde debido al riego que reciben durante el proceso de crecimiento. Por esta razón, la optimización del uso de estos materiales en el proceso constructivo y la búsqueda de materiales alternativos en el proceso de diseño generan una disminución importante en la HH.

Cuadro 1. Huella hídrica azul y verde en m³ asociada al consumo de materiales.

Material	Unidad	Factor de HH Azul	Factor de HH Verde	Proyecto 1			Proyecto 2			Proyecto 3			Proyecto 4		
				Cantidad	HH Azul m ³	HH Verde m ³	Cantidad	HH Azul m ³	HH Verde m ³	Cantidad	HH Azul m ³	HH Verde m ³	Cantidad	HH Azul m ³	HH Verde m ³
Cemento	ton	1.15	NA	20.75	23.86	NA	26.25	30.19	NA	19.69	22.64	NA	24.15	27.77	NA
Mortero de pega	ton	1.97	NA	14.00	27.58	NA	10.20	20.09	NA	11.48	22.62	NA	9.49	18.69	NA
Repello fino	ton	1.50	NA	7.88	11.82	NA	6.00	9.00	NA	4.86	7.29	NA	5.82	8.73	NA
Repello grueso	ton	1.15	NA	7.88	9.06	NA	6.00	6.90	NA	4.20	4.83	NA	5.58	6.42	NA
Arena	ton	2.26	NA	29.00	65.54	NA	25.02	56.55	NA	17.76	40.15	NA	21.52	48.63	NA
Piedra	ton	2.26	NA	29.60	66.90	NA	32.00	72.32	NA	24.32	54.96	NA	27.84	62.92	NA
Lastre	ton	2.26	NA	11.20	25.31	NA	8.80	19.89	NA	6.95	15.71	NA	8.45	19.09	NA
Bloques	m ³	1.04	NA	60.35	62.77	NA	34.13	35.49	NA	26.28	27.33	NA	31.06	32.30	NA
Varillas	ton	32.81	NA	2.95	96.72	NA	3.39	111.13	NA	3.08	101.13	NA	3.05	100.01	NA
Malla electrosoldada	ton	32.81	NA	0.39	12.76	NA	0.45	14.60	NA	0.36	11.97	NA	0.43	14.02	NA
Gypsum	m ²	0.02	NA	290.14	5.08	NA	193.49	3.39	NA	143.18	2.51	NA	191.56	3.35	NA
Furring	ml	15.20	NA	0.03	0.46	NA	0.02	0.30	NA	0.02	0.23	NA	0.02	0.29	NA
Perfiles galvanizados	ton	13.20	NA	0.82	10.88	NA	1.10	14.57	NA	0.91	11.95	NA	0.99	13.12	NA
Plywood	m ³	0.09	15.10	0.05	0.01	0.82	1.15	0.11	17.31	0.94	0.09	14.19	1.09	0.10	16.44
Láminas de zinc	m ²	0.24	NA	50.00	11.95	NA	NA	NA	NA	45.00	10.76	NA	49.50	11.83	NA
Teja asfáltica	m ²	0.24	NA	NA	NA	NA	120.00	28.68	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Vidrio	m ²	0.02	NA	52.50	1.05	NA	35.00	0.70	NA	29.75	0.60	NA	34.30	0.69	NA
Concreto premexclado	m ³	6.33	NA	42.00	265.86	NA	14.00	88.62	NA	10.08	63.81	NA	12.74	80.64	NA
Estereofón	m ³	0.34	NA	18.03	6.19	NA	9.58	3.29	NA	7.47	2.56	NA	8.82	3.02	NA
Madera formaleta	m ³	1.01	291.00	6.86	6.93	1995.39	4.57	4.62	1329.58	3.47	3.51	1010.48	4.52	4.57	1316.28
Energía	GJ	22.30	NA	NA	NA	NA	0.58	12.96	NA	0.51	11.37	NA	0.51	11.27	NA
PVC presión	kg	0.73	NA	32.03	23.44	NA	24.05	17.61	NA	18.76	13.73	NA	22.13	16.20	NA
PVC sin presión y conduit	kg	0.72	NA	352.28	252.23	NA	209.11	149.72	NA	156.83	112.29	NA	194.47	139.24	NA
Combustible	m ³	6.00	NA	1.08	6.45	NA	0.33	1.95	NA	0.29	1.76	NA	0.29	1.74	NA
Porcelanato	m ²	0.03	NA	NA	NA	NA	170.00	5.78	NA	122.40	4.16	NA	146.20	4.97	NA
Azulejo	m ²	0.03	NA	NA	NA	NA	70.00	1.89	NA	55.30	1.49	NA	67.90	1.83	NA
Cerámica	m ²	0.03	NA	NA	NA	NA	15.00	0.39	NA	11.25	0.29	NA	13.80	0.36	NA
Mortero adhesivo	ton	1.97	NA	NA	NA	NA	2.52	4.96	NA	1.99	3.92	NA	2.34	4.62	NA
Pintura	kg	0.04	NA	NA	NA	NA	372.00	13.76	NA	301.32	11.15	NA	353.40	13.08	NA
Pintura anticorrosiva	kg	0.11	NA	NA	NA	NA	12.00	1.32	NA	9.96	1.10	NA	11.88	1.31	NA

En el Cuadro 2 que se presenta a enseguida muestra los resultados de HH azul total y HH verde total por m² de construcción. Además, presenta los resultados de HH parcial estimada por m². Se debe recordar que en las limitaciones se indicó que en el contexto nacional no fue posible estimar la HH gris, por lo que no se logra obtener la HH total completa como indicador. Según lo que se observa de los datos obtenidos, la varianza en datos de Huella Hídrica azul directa por m² de construcción es cercana a 0; esto implica que la serie de datos obtenida es bien representada por el valor promedio. Lo que se puede deber a la relación lineal que hay entre el consumo directo y el tiempo de ejecución de la obra; dado que, para los proyectos de estudio, el tiempo de ejecución fue proporcional a los m² de construcción.

Por otra parte, los datos obtenidos de Huella Hídrica parcial por m² de construcción tienen una varianza alta. Esto se debe a que en este valor también se refleja la huella asociada a los materiales utilizados y estos datos son propios de cada proyecto. Por esta razón, se puede considerar que el valor de HH parcial por m² es más relevante para efectos de sostenibilidad debido a que incluye todo el proceso de producción.

Cuadro 2. HH azul directa y parcial estimada por m² de construcción

Parámetro reportado	Proyecto 1	Proyecto 2	Proyecto 3	Proyecto 4
Huella Hídrica Azul indirecta (m ³)	992.84	730.77	1346.88	565.89
Huella Hídrica Verde indirecta (m ³)	1996.20	1346.88	1024.67	1332.72
Huella Hídrica indirecta (m ³)	2989.04	2077.65	1590.56	1983.52
Huella Hídrica azul directa (m ³)	69.52	51.02	41.92	57.27
Huella Hídrica azul total (m ³)	1062.36	781.79	607.82	708.07
Huella Hídrica parcial (m ³)	3064.29	2132.83	1632.48	2040.79
Área de construcción (m ²)	187.00	180.35	135.55	173.13
Huella Hídrica azul directa por m ² de construcción (m ³ /m ²)	0.37	0.28	0.31	0.33
Huella Hídrica parcial por m ² de construcción (m ³ /m ²)	16.39	11.76	12.04	11.79
Promedio de datos de HH azul directa por m ² de construcción (m ³ /m ²)	0.32			
Varianza en datos de HH azul directa por m ² de construcción (m ³ /m ²)	0.00093			
Promedio de datos de HH parcial por m ² de construcción (m ³ /m ²)	12.64			
Varianza en datos de HH parcial por m ² de construcción (m ³ /m ²)	3.40			

Finalmente, en el Cuadro 3 se muestra un resumen de la HH azul directa y la HH parcial estimada para cada proyecto de estudio. En esta también se muestran los porcentajes de las HH parciales estimadas correspondientes a la HH azul directa, donde los porcentajes no superan el 2.81% y promedian un 2.51%, esto quiere decir que, en promedio, el 97.49% del total de agua utilizada en la cadena de producción no es representada como consumo directo en las obras. De ahí la importancia de realizar el cálculo de la HH parcial para proyectos constructivos como un indicador de sostenibilidad y no solamente tomar en cuenta los consumos medidos por los hidrómetros de cada proyecto.

Cuadro 3. Porcentaje de HH parcial equivalente a la HH azul directa.

Proyecto	HH azul directa m ³	HH parcial estimada m ³	Porcentaje de la HH parcial equivalente a la HH azul directa
1	69.52	3064.29	2.27
2	51.02	2132.83	2.39
3	41.92	1632.48	2.57
4	57.27	2040.79	2.81
Promedio	54.93	2217.60	2.51

Consideraciones finales

Estas primeras estimaciones de la HH parcial para el proceso constructivo de cuatro proyectos de vivienda unifamiliar en Costa Rica podrían considerarse como un primer avance para estandarizar el cálculo de la HH que busca impulsar el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos (CFIA). Para los proyectos de estudio, se calculó la HH azul directa y se observó que esta es directamente proporcional a la duración del proyecto; además, los datos reflejaron que la tasa de crecimiento de la huella con el tiempo es lineal y se comporta de manera similar para todos los casos estudiados. Al calcular la tasa de consumo de HH azul directa por metro cuadrado de construcción en los proyectos se evidencia que el conjunto de datos tiene muy poca variación con respecto a la media; por lo tanto, ese dato podría ser un factor representativo para demostrar la sostenibilidad del consumo de agua en la ejecución de un proyecto. Sin embargo, se requiere realizar más estudios para estimar un parámetro de sostenibilidad más robusto. Adicionalmente, se requiere que en el país se trabaje en la generación de más datos de base por material, ya que este punto fue uno de los más complejos y con mayor incertidumbre de todo el proceso. Además se requiere fomentar más investigación para que se logre contar con información certera de la HH gris a nivel nacional.

Por otro lado se comprobó que para reducir la huella hídrica en los proyectos de construcción se debe realizar una gestión sostenible del agua. Pues aunque el consumo directo representa un porcentaje bajo de la totalidad del agua, se evidenció que no existen prácticas que propicien el ahorro del recurso. Por otra parte, se demostró que el 97.9% del agua que se consume en los proyectos está oculta en los procesos productivos de los materiales de construcción utilizados; por esta razón, se hace importante hacer el cálculo de la HH total para cuantificar el volumen de agua total utilizado en las obras y no solo los consumos directos. De la investigación realizada para obtener los factores para el cálculo de HH indirecta por material se concluye que las declaraciones ambientales de producto son la mejor herramienta disponible en el país en la que se muestra información ambiental de los procesos productivos; por ende, se debe incentivar a los productores nacionales a generar y actualizar este tipo de información.

En particular, de los factores para el cálculo de la HH azul indirecta se concluye que los procesos productivos del PVC y materiales ferrosos son los que generan el mayor consumo de agua; por esta razón, si se sustituyen dichos materiales, aunque sea parcialmente, por otros similar que necesiten una menor cantidad de agua en su proceso productivo se puede disminuir la HH indirecta del producto final. Este punto es relevante pues son materiales que se han generalizado mucho en las construcciones en el país, y su sustitución puede no ser tan factible y presentar gran reticencia por parte de los constructores.

Al finalizar la investigación se determinó que el cálculo de la HH azul directa de los proyectos se puede realizar con facilidad; ya que solo se necesita el dato de consumo de agua tomado de un hidrómetro que se coloque según las especificaciones técnicas de tal manera que no genere datos erróneos. Este equipo suele ser instalado en campo por la compañía que suministra el agua potable en la zona del proyecto, pero no es un uso generalizado en todo el país. Lo importante es que se instale desde el inicio de las obras, para llevar el control adecuado; ya que se conoce que en algunas ocasiones durante el proceso constructivo se aplica una tarifa plana y no se instalan medidores.

Por otro lado, se evidencio la relevancia de generar una base de datos robusta con factores obtenidos de DAP para la estimación de la HH indirecta. Estos datos constituyen el pilar para realizar una estimación de dicha huella y a la vez aportarían también en otros indicadores ambientales para el cálculo de una huella de carbono. Dicho esto, se puede aprovechar los esfuerzos a nivel país en el tema de cálculo de las huellas de carbono para consolidar los esfuerzos en medición de la sostenibilidad y a la vez introducir la huella hídrica como indicador adicional en la construcción.

Adicionalmente, se considera oportuno impulsar más fuertemente la teoría de producción más limpia aplicada a la construcción para disminuir la HH directa, pues se detectaron muchas malas prácticas que generan aumentos de consumo. Acciones simples como cerrar las llaves de chorro mientras no se estén utilizando, colocar una pistola a la manguera para controlar de una mejor forma el flujo del agua, revisar que las mangueras, conexiones, llaves y otros estén libres de fugas, recolectar agua de lluvia y utilizarla de manera eficiente, entre otros puede contribuir a bajar la HH directa de los proyectos. Esta teoría también puede utilizarse para disminuir la HH indirecta en el proyecto, mediante acciones como promover las compras de materiales locales para reducir consumo asignado a los viajes, buenas prácticas constructivas con el fin de reducir los desperdicios de material, regular el consumo de energía eléctrica en la construcción, utilizar madera de rápido crecimiento para disminuir la HH verde, entre otras.

Finalmente, se considera que introducir el concepto de HH en los sistemas de evaluación de sostenibilidad en la construcción a nivel nacional contribuiría con las metas país en el tema, ayudará al cumplimiento de los ODS e iniciaría una cultura de análisis integral de la sostenibilidad de los proyectos.

Apéndice 1

Datos de huella hídrica asociada a materiales de construcción

Para generar una base de datos de huella hídrica azul y verde válida, se analizaron declaraciones ambientales de producto (EDP) de distintos materiales de construcción, los cuales se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Base de datos de huella hídrica.

Material	Unidad	Para Huella hídrica expresada en m ³ de agua por unidad de material		Fuente
		Huella azul	Huella Verde	
Acero de refuerzo soldable	ton	32.81	NA	[11]
Acero de refuerzo no soldable	ton	32.72	NA	[11]
Bloques de concreto	m ³	1.040	NA	[12]
Madera blanda aserrada	m ³	1.01	291	[13]
Madera dura aserrada	m ³	1.17	927	[14]
Plywood	m ³	0.094	15.1	[15]
Agregados	ton	2.26	NA	[16]
PVC-U presión	kg	0.732-0.751	NA	[17]
PVC-O presión	kg	0.705-0.731	NA	[17]
PVC-M presión	kg	0.748-0.775	NA	[17]
PVC sin presión y conduit	kg	0.716-0.792	NA	[18]
Concreto premezclado	m ³	6.33	NA	[19]
Cemento industrial en saco	ton	1.15	NA	[20]
Cemento industrial a granel	ton	0.98	NA	[20]
Cemento fuerte en saco	ton	0.94	NA	[21]
Cemento fuerte a granel	ton	0.77	NA	[21]
Plyrock	ton	3.54	NA	[22]
Trims	ton	3.56	NA	[23]
Fibrolit	ton	3.80	NA	[24]
Plystone	ton	3.66	NA	[25]
Siding	ton	4.12	NA	[26]
Plydeck	ton	6.97	NA	[27]
Acero galvanizado, pintado y troquelado	ton	13.20	NA	[28]
Lámina TRD 91.5	ton	12.20	NA	[29]
Vigas y columnas de acero	ton	10.80	NA	[30]
Stud	ton	9.30	NA	[30]
Canoas metálicas	ton	11.40	NA	[30]
Metaldeck	ton	13.20	NA	[30]

Referencias

- [1] Programa Estado de la Nación. "Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible". 2018. San José, Costa Rica
- [2] Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. "Hogares ticos consumen más agua que resto de centroamericanos". 2018. <https://www.inteco.org/blog/noticias-2/hogares-ticos-consumen-mas-agua-que-resto-de-centroamericanos-146#:~:text=La%20%E2%80%9CGu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20el,utiliza%20en%20el%20servicio%20sanitario.>
- [3] Water Footprint Network. "Product Water Footprints". 2016. <https://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/product-gallery/>
- [4] Universidad Católica. Santo Toribio de Mogrovejo. "APLICACIONES DEL AGUA EN LA INGENIERÍA CIVIL". 2014. Perú
- [5] Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). "Programa Bandera Azul Ecológico Categoría Construcción Sostenible". 2017. San José, Costa Rica
- [6] Cámara Costarricense de la Construcción (CCC). "Guía Construcción Sostenible". 2016. San José, Costa Rica
- [7] Castillo, J. "Metodología para el control y análisis del consumo de agua durante la fase constructiva de obra gris". 2021. (Trabajo final de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil). Universidad de Costa Rica.
- [8] Naciones Unidas. (UN). "Objetivo 6 del Desarrollo Sostenible: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos". Nueva York, Estados Unidos. 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [9] Naciones Unidas. (UN). (2021). "Objetivo 12 del Desarrollo Sostenible: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenible". Nueva York, Estados Unidos. 2021. <https://www.un.org/sustainabledevelopment>
- [10] Hoekstra, A. Chapagain, A. Aldaya, M. y Mekonnen, M. "Manual de evaluación de huella hídrica". Londres, Inglaterra, Washington DC, Estados Unidos. 2011. https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf
- [11] CAP Acero. "Steel reinforcing bar (weldable and nonweldable)". 2020. Santiago, Chile
- [12] ASTM. "NORMAL-WEIGHT AND LIGHT-WEIGHT CONCRETE MASONRY UNITS AS MANUFACTURED BY MEMBERS OF THE CANADIAN CONCRETE MASONRY PRODUCERS ASSOCIATION (CCMPA) ". 2016. Ontario, Canada.
- [13] Wood Solutions design and build. "Environmental Product Declaration Softwood Timber". 2020. Australia
- [14] Wood Solutions design and build. "Environmental Product Declaration Hardwood Timber". 2020. Australia.
- [15] Wood Solutions design and build. "Environmental Product Declaration Plywood Timber". 2020. Australia.
- [16] Holcim. "Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012 Average Aggregate". 2020. Rumania
- [17] Iplex Pipelines. "ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION PVC PRESSURE PIPES FOR BUILDING APPLICATIONS". 2020. Australia.
- [18] Iplex Pipelines. "ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION PVC NON PRESSURE PIPES FOR BUILDING APPLICATIONS". 2020. Australia.
- [19] Cementos Bio Bio. (CBB). "Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025 and EN 15804 for: Ready-Mix Concrete G025 (10)-20-12-28-B". 2018. Santiago, Chile.
- [20] Holcim. "Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012 Cemento industrial". 2019. Cartago, Costa Rica
- [21] Holcim. "Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012 Cemento fuerte". 2019. Cartago, Costa Rica.
- [22] Plycem. "Declaración Ambiental de Producto De acuerdo con ISO 14025 y EN 15804:2012+A1 para: Plyrock". 2020. Costa Rica.
- [23] Plycem. "Declaración Ambiental de Producto De acuerdo con ISO 14025 y EN 15804:2012+A1 para: Trims". 2020. Costa Rica.
- [24] Plycem. "Declaración Ambiental de Producto De acuerdo con ISO 14025 y EN 15804:2012+A1 para: Fibrolit". 2020. Costa Rica.

- [25] Plycem. “Declaración Ambiental de Producto De acuerdo con ISO 14025 y EN 15804:2012+A1 para: Plystone”. 2020. Costa Rica.
- [26] Plycem. “Declaración Ambiental de Producto De acuerdo con ISO 14025 y EN 15804:2012+A1 para: Siding”. 2020. Costa Rica.
- [27] Plycem. “Declaración Ambiental de Producto De acuerdo con ISO 14025 y EN 15804:2012+A1 para: Siding”. 2020. Costa Rica.
- [28] Ternium México. “Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012 for Galvanized, painted and die rolling steel manufactured”. 2019. México
- [29] Ternium México. “Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012 for Ternium TRD 91.5 Roof Deck”. 2019. México.
- [30] Ternium México. “Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025:2006 and EN 15804:2012 for Steel Building Structure Products manufactured”. 2019. México

Análisis Acústico del Teatro Nacional de Costa Rica a partir de sus Respuestas Impulsionales

Acoustical Analysis of the National Theatre of Costa Rica by means of its Room Impulse Responses

Alejandro Delgado-Castro¹, Brayán Mauricio Méndez-Picado²

Fecha de recepción: 14 de abril, 2023
Fecha de aprobación: 7 de setiembre, 2023

Delgado-Castro, A; Méndez-Picado, B.M. Análisis acústico del Teatro Nacional de Costa Rica a partir de sus respuestas impulsionales. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 49-59.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6692>

- 1 Universidad de Costa Rica, Sede Regional de Guanacaste. Costa Rica.
Correo electrónico: alejandro.delgadocastro@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5475-7813>
- 2 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: brayan.mendez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4321-7309>

Palabras clave

Acústica; sonido; respuestas impulsionales; parámetros acústicos; grabaciones sonoras; auralización; Teatro Nacional de Costa Rica.

Resumen

En este artículo se aborda el tema de la caracterización acústica de la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica, realizada a partir de la estimación y el análisis de sus respuestas impulsionales, las cuales se obtienen a su vez a partir del procesamiento de grabaciones sonoras realizadas dentro del espacio, utilizando un parlante de 8 pulgadas como fuente sonora. Se presenta la respuesta impulsional promedio de la sala principal, en formato monoaural y estereofónico, y se obtienen los parámetros acústicos del teatro con el fin de estimar los tiempos de reverberación, los índices de claridad y de definición, tanto de la música como de la voz, así como la calidez y el brillo de la sala, para así brindar una caracterización de la acústica del espacio. Dado que el Teatro Nacional de Costa Rica es una institución dedicada a la promoción de las artes escénicas de alto nivel en el país, así como un monumento histórico y arquitectónico que se conserva para el uso y disfrute del público en general, los resultados aquí presentados constituyen un registro digital de la forma en la que el sonido se propaga dentro de este singular espacio.

Keywords

Room acoustics; sound; room impulse response; acoustical parameters; audio recordings; auralisation; National Theatre of Costa Rica.

Abstract

In this work, the main hall of the National Theatre of Costa Rica is studied in order to obtain an acoustical characterisation of this particular space, based on its estimated room impulse responses, which are measured using an 8-inch loudspeaker as the sound source. These impulse responses are obtained in mono and stereo formats and then used to estimate a set of acoustical parameters, which are then used to estimate the reverberation time, the clarity and definition of the voice and music, as well as other details such as the warmth and brilliance of the room, providing a basis for the acoustical characterisation of the hall. Given the unique features of the National Theatre and its importance as the prime venue for performing arts in Costa Rica, the analysis presented here constitutes a record of its room acoustics and provides a perspective that could help understanding the way in which sound propagates inside this peculiar hall.

Introducción

El Teatro Nacional de Costa Rica es un destacado inmueble de estilo neoclásico alemán, que se encuentra ubicado en la ciudad de San José, en el distrito Catedral, sobre la Avenida 2 y entre las Calles 3 y 5. El edificio es considerado como uno de los más importantes en el país, y es también una joya arquitectónica de la ciudad de San José. Su construcción dio inicio en 1891, a partir de los planos iniciales elaborados por los ingenieros León Tessier, Luis Matamoros, Nicolás Chavarría y Ángel Miguel Velázquez, siendo inaugurado en 1897 con la presentación de la ópera *El Fausto*, de Charles Gounod. En su construcción se utilizaron finos materiales nacionales, como piedra, ladrillos y madera, así como mármol, metales y otros materiales importados de Europa [1, 2].

En este trabajo se realiza una caracterización de la acústica de la sala principal del Teatro Nacional, fundamentada en el análisis de los parámetros acústicos obtenidos a partir de la estimación de su respuesta impulsional. Los resultados generados permiten establecer relaciones entre los elementos presentes en el espacio, y aspectos como el tiempo de reverberación, la claridad de la música y de la voz, así como el brillo y la calidez de la sala.

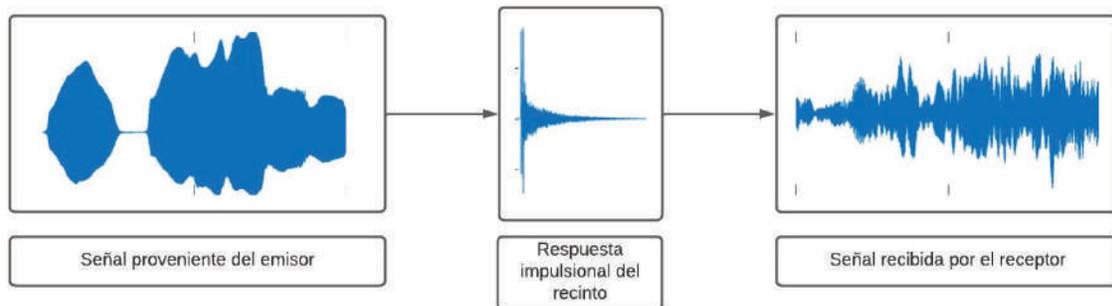


Figura 1. Sistema caracterizado por su respuesta impulsional.

La respuesta impulsional de una sala es la representación temporal de su función de transferencia, la cual relaciona cualquier fuente de sonido ubicada dentro de ella, con el micrófono o receptor que se utilice para registrar el sonido producido. La respuesta impulsional engloba las características acústicas del espacio y permite estimar indicadores que permiten evaluar de forma objetiva la calidad de la experiencia auditiva de quienes se encuentran dentro de la sala [3].

Considerando la sala principal del Teatro Nacional como un sistema, se puede obtener el sonido que escucharía el oyente en una cierta posición dentro de ella al tomar la convolución entre la fuente de sonido original y la respuesta impulsional de la sala. Así, para un sistema como el que se muestra en la Figura 1, la respuesta de la sala está dada por la Ecuación 1, donde $x(t)$ es la señal de excitación del sistema; $y(t)$ es la respuesta del sistema recibida por el oyente o receptor; y $h(t)$ es la respuesta impulsional.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ahora bien, la respuesta impulsional de la sala se puede extraer mediante la deconvolución de las señales registradas tanto en el emisor como en el receptor. En este caso, la señal emitida es conocida y las señales recibidas se pueden registrar dentro de la sala utilizando micrófonos. La respuesta impulsional obtenida brinda información sobre el sonido directo y sus reflexiones tempranas y tardías, por lo que suele ser utilizada para estimar una serie de parámetros que permiten a su vez, evaluar las características acústicas del espacio.

Los parámetros acústicos utilizados en esta evaluación se definen en la norma ISO-3382-1 [4], la cual describe el procedimiento necesario para realizar una medición del tiempo de reverberación de un espacio, así como los equipos requeridos. La norma también hace referencia a otros parámetros acústicos y los clasifica en diferentes categorías según su aplicación. A continuación, se definen los parámetros que serán utilizados en este estudio.

Cuadro 1. Tiempos de reverberación recomendados para ciertos espacios.

Espacio	Tiempo de Reverberación Recomendado
Aulas	0,4 s a 0,6 s
Oficinas	0,5 s a 1,1 s
Sala de Conciertos	1,4 s a 2,0 s
Templos o Iglesias	2,0 s a 10,0 s

Tiempo de Reverberación (RT)

Se define como el tiempo transcurrido desde el momento en que la fuente sonora se detiene, hasta el instante en que el nivel de presión sonora en el recinto se reduce 60 dB por debajo de su nivel original; su valor se mide en segundos. En aquellos casos donde el nivel de ruido de fondo no permite observar un decaimiento de 60 dB en el nivel de presión sonora, se suelen utilizar los parámetros T20 o T30, los cuales corresponden al tiempo de reverberación extrapolado a partir de un decaimiento de 20 dB o 30 dB en la presión del sonido dentro de la sala, respectivamente. Los parámetros T20 y T30 también se miden en segundos y se obtienen para diferentes bandas de frecuencia. El Cuadro 1 muestra los tiempos de reverberación recomendados para ciertos espacios.

Tiempo de Reverberación Temprano (EDT)

Es un parámetro acústico que se relaciona más con la reverberación percibida y depende en mayor medida de las reflexiones tempranas. Su valor se obtiene a partir de la regresión lineal de los primeros 10 dB de la curva de decaimiento de Schroeder, la cual se obtiene a partir del cuadrado de la integral de la respuesta impulsional de la sala.

Claridad de la Voz y de la Música (C50 y C80)

La claridad es la relación entre la energía del sonido que recibe la persona oyente durante los primeros instantes a partir de la llegada del sonido directo, y la energía del sonido recibido después de ese lapso. La claridad de la voz (C50) se estima considerando un lapso de 50 ms, mientras que la claridad de la música (C80) toma 80 ms como intervalo de tiempo. Ambos indicadores se obtienen por cada banda de frecuencias, sus valores se expresan en decibeles, y entre más alto sea su valor, mejor será la claridad de la voz o de la música. También es posible realizar una caracterización del espacio por medio del parámetro $C_{50(AV)}$, que se define como la inteligibilidad de la palabra, y se calcula por medio de la Ecuación 2 [5].

$$C_{50(AV)} = 0,15C_{50}(500Hz) + 0,25C_{50}(1kHz) + 0,35C_{50}(2kHz) + 0,25C_{50}(4kHz)$$

(Ecuación 2)

Así mismo, un valor representativo para la inteligibilidad de la música es el parámetro $C_{80(AV)}$, que se calcula por medio de la Ecuación 3 [5].

$$C_{80(AV)} = \frac{C_{80}(500Hz) + C_{80}(1kHz) + C_{80}(2kHz)}{3}$$

(Ecuación 3)

Definición (D50)

La definición es el parámetro que relaciona la energía que llega al escucha durante los primeros instantes de tiempo desde que el sonido directo ha sido emitido, con la energía total emitida por la fuente sonora. Para la definición de la voz se considera un lapso de 50 ms, y su valor se expresa como porcentaje. Cuando la definición es baja, se puede afirmar que la sala es poco íntima, mientras que, por encima de 50% se considera aceptable [6].

Calidez (BR)

Una buena respuesta de la sala ante sonidos con frecuencias bajas denotará una riqueza de graves, una suavidad y melosidad de la música en la sala, y a esto se le denomina calidez acústica. Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias bajas, y la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias medias, como se muestra en la Ecuación 4 [7].

$$BR = \frac{RT(125 \text{ Hz}) + RT(250 \text{ Hz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1000 \text{ Hz})} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Brillo (Br)

Este parámetro es similar a la calidez, sin embargo, el brillo considera la respuesta de la sala ante las frecuencias altas, lo cual determina qué tan claro es el sonido, así como qué tan brillante es. Se calcula como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias altas y la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias medias, como se muestra en la Ecuación 5 [7].

$$Br = \frac{RT(2000 \text{ Hz}) + RT(4000 \text{ Hz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1000 \text{ Hz})} \quad (\text{Ecuación 5})$$

El análisis de los parámetros anteriores permite evaluar de manera objetiva la calidad de la experiencia auditiva que brinda una sala, así como identificar la influencia que en ella tienen los elementos que la forman. Conocer el desempeño acústico de un espacio permite establecer estrategias de tratamiento acústico que permitan embellecer y mejorar el espectáculo artístico por medio del uso de ciencia e ingeniería [8].

Finalmente, la respuesta impulsional de la sala en formato estereofónico puede ser utilizada para generar efectos sonoros como la auralización, que se define como el proceso mediante el cual el oyente percibe un sonido como si él lo estuviera escuchando dentro de un espacio específico, con la particularidad de que dicho proceso se realiza de manera computacional, sin que el oyente se encuentre físicamente en dicho espacio. La auralización se lleva a cabo mediante la convolución de una señal de audio anecoica con la respuesta al impulso de la sala, ya sea calculada o medida en la ubicación del receptor [9].

Metodología

En este estudio, se obtienen respuestas impulsionales para diferentes puntos dentro de la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica, mediante el análisis de barrido en frecuencia propuesto por Oygo Sound LLC [10] para Matlab³. En este proceso se utiliza una señal de

excitación senoidal cuya frecuencia se incrementa logarítmicamente a través del tiempo, iniciando en 20 Hz y terminando en 20 kHz, lo cual permite cubrir el espectro de frecuencias audibles del ser humano. La señal de excitación mencionada se sintetiza digitalmente considerando una frecuencia de muestreo de 48 kHz, una amplitud de 1, y una duración de 20 s. La señal de excitación es luego utilizada como fuente de sonido cuando es reproducida por un parlante dentro de la sala. De acuerdo con los criterios indicados por Papadakis et al. [11], en este trabajo se emplea un parlante de 8 pulgadas con el fin de obtener resultados útiles, a un costo menor, similares a los presentados en repositorios como OpenAir [12]. El parlante en cuestión es el modelo Kohlt Porta 8⁴, el cual es colocado en el centro del escenario, sobre un pedestal de aproximadamente 1 m de alto.

El sonido emitido por la fuente se propaga por el espacio y es registrado por micrófonos ubicados en puntos particulares de la sala, denominados puntos de medición. Por cada uno de ellos se realiza una grabación sonora en formato monoaural, y otra en formato estereofónico. Aquí se utiliza un micrófono omnidireccional Behringer EMC 8000, y un par estéreo formado por dos micrófonos cardiodes Audio Technica AT2020. La señal de excitación es enviada al parlante a través de una interfase de audio Focusrite Scarlett 4i4, la cual es también utilizada para recibir en la computadora las señales capturadas por los micrófonos, permitiendo así su almacenamiento en forma de archivos de audio sin pérdidas. Como estación de audio digital en la computadora se utiliza el programa Reaper⁵.

Para cada punto de medición se obtiene una respuesta impulsional monoaural y otra estereofónica, por medio de la deconvolución de las señales recibidas por los micrófonos y la señal de excitación. Se define un total de 16 puntos de medición dentro de la sala principal del teatro, en las ubicaciones que se muestran en el diagrama de la Figura 2. La sección de la luneta es cubierta con 9 puntos de medición, más uno adicional ubicado detrás de la cabina de sonido, donde se encuentra la mesa de mezcla. Otros tres puntos de medición se ubican en la sección de butaca, en el primer nivel, y se incluye el pasillo de acceso a la luneta. Finalmente, tres puntos de medición adicionales son colocados en el nivel de palcos, uno a cada lado y otro al centro, en el palco conocido como presidencial.

Las respuestas impulsionales promedio de la sala, tanto en monoaural como en estereofónico, son obtenidas al promediar las respuestas impulsionales estimadas en cada uno de los puntos de medición. Luego, analizando la respuesta promedio monoaural con el software Room EQ Wizard (REW)⁶, se realiza una estimación de la curva de decaimiento de la presión sonora en la sala, de acuerdo con la norma ISO 3382-1, y tomando el cuadrado de su integral se obtiene la curva de decaimiento de Schroeder, la cual se utiliza para estimar el tiempo de reverberación y los parámetros acústicos para un total de siete bandas de octava con frecuencias centrales que van desde los 125 Hz hasta los 8 kHz.

4 <http://www.kohlt-usa.com/esp/porta8.html>

5 <https://www.reaper.fm>

6 <https://www.roomeqwizard.com>

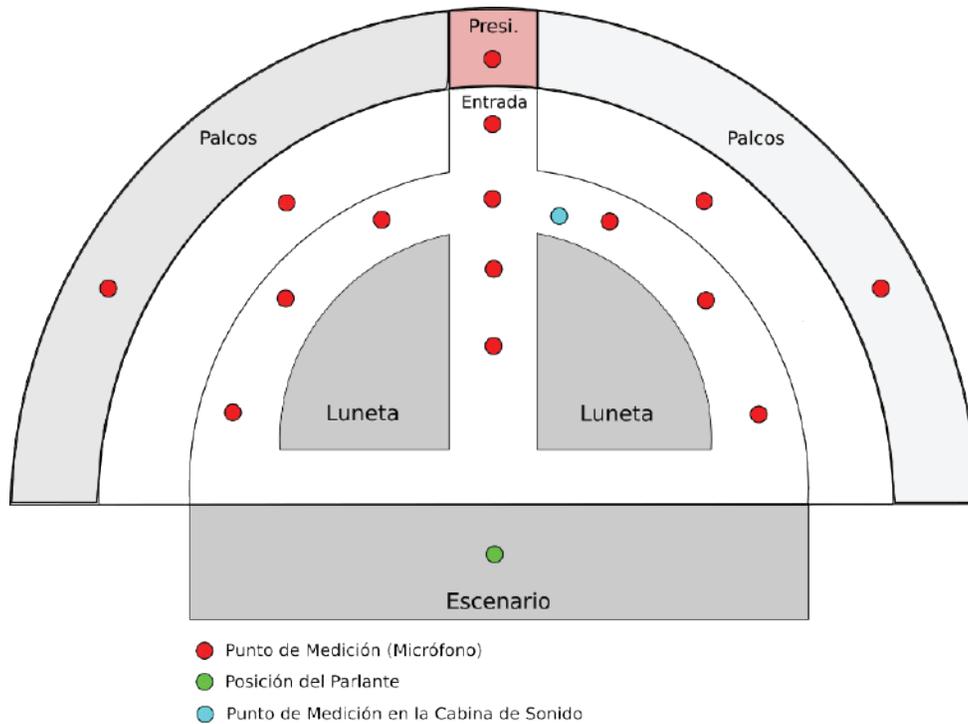


Figura 2. Distribución de puntos de medición.

En la siguiente sección se presentan las respuestas impulsionales obtenidas a partir de las mediciones realizadas, así como los parámetros acústicos estimados. Posteriormente se realiza un análisis de estos resultados y se presenta una caracterización acústica del espacio, donde se relacionan los materiales presentes en el edificio con la forma en la que se propaga el sonido dentro de él y la calidad de la experiencia auditiva que brinda la sala.

Resultados

La respuesta impulsional promedio en formato monoaural se muestra en la Figura 3, mientras que la respuesta impulsional promedio en formato estereofónico se muestra en la Figura 4. La curva de decaimiento de Schroeder se puede observar en la Figura 5.

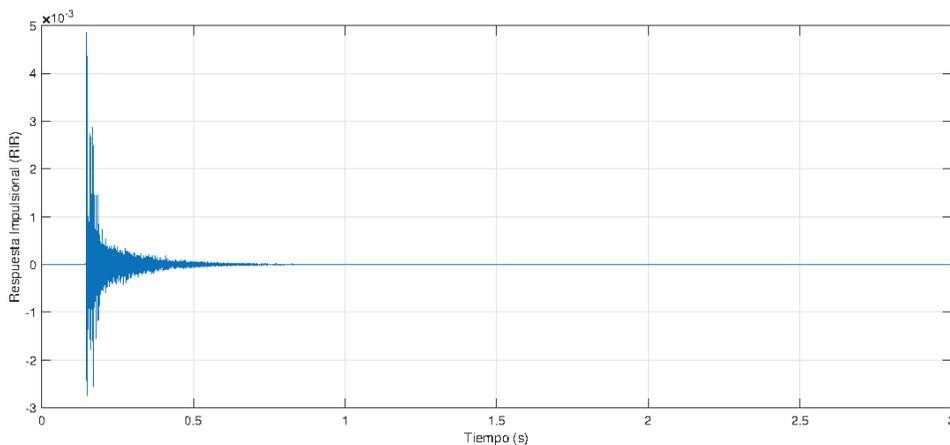


Figura 3. Respuesta impulsional monoaural de la sala principal del Teatro Nacional.

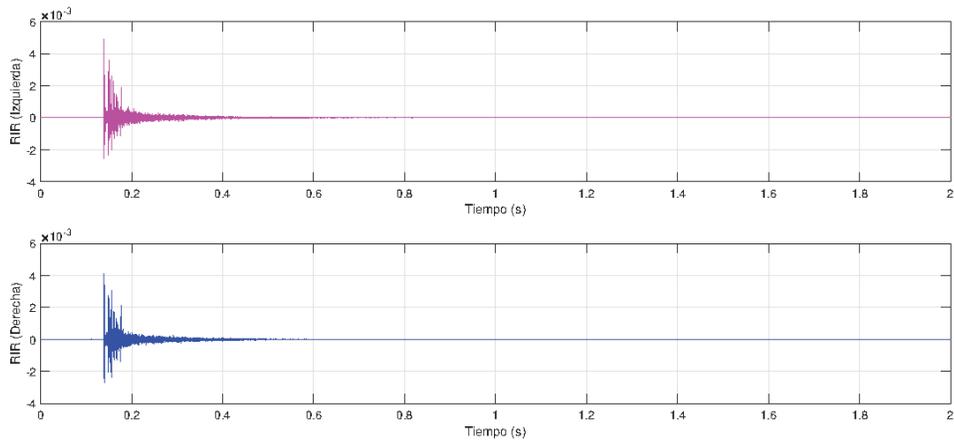


Figura 4. Respuesta impulsional estereofónica de la sala principal del Teatro Nacional.

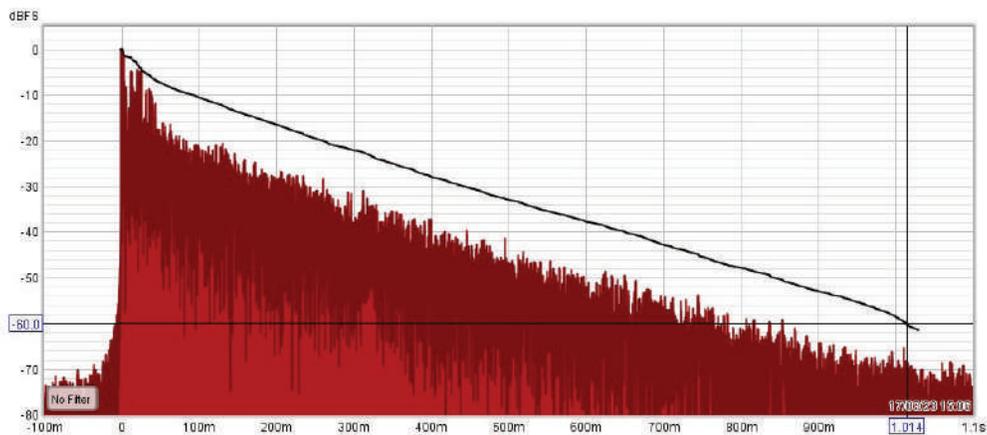


Figura 5. Curva de decaimiento de Schroeder estimada por el software REW.

Por su parte, el Cuadro 2 muestra los parámetros acústicos estimados a partir del análisis de la respuesta impulsional promedio monoaural por medio de la herramienta REW. Las respuestas impulsionales anteriores se encuentran disponibles en el sitio web del proyecto⁷, donde pueden ser descargadas en formato WAV. En el sitio también se presenta la auralización de una grabación anecoica utilizando la respuesta impulsional de la Figura 4.

Cuadro 2. Parámetros acústicos de la sala principal del Teatro Nacional.

Parámetro	Banda de Frecuencias						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT	0,724	0,778	1,048	0,988	1,051	0,536	0,303
T20	1,072	1,106	1,118	1,101	1,152	0,986	0,797
T30	1,406	1,222	1,131	1,163	1,168	1,015	0,833
C50	1,35	2,46	-0,04	1,69	2,31	6,47	9,26
C80	4,21	4,86	3,09	4,22	5,00	9,03	12,27
D50	57,7	63,8	49,8	59,6	63,0	81,6	89,4

7 <https://electricasg.ucr.ac.cr/acustica.html>

La gráfica de la Figura 5 muestra un tiempo de reverberación total de aproximadamente 1,014 s para la sala principal del Teatro Nacional, el cual es bastante similar al promedio de los valores reportados en el Cuadro 2 para los parámetros T20 y T30.

Considerando que el volumen de la sala principal es de aproximadamente 7200 m³, con un área de planta aproximada de 600 m², el tiempo de reverberación obtenido puede que sea un valor bajo, en especial para una sala de conciertos de este tipo, donde se recomienda un tiempo de reverberación de entre 1,4 s y 2,0 s (ver Cuadro 1). Este comportamiento también se evidencia en los valores obtenidos para el parámetro EDT en cada banda de frecuencias, pues lo recomendable para una sala donde se realizan interpretaciones musicales es que los valores de EDT para frecuencias medias (entre 500 Hz y 1 kHz) se encuentren por encima de 1,5 s. No obstante, los valores presentados en el Cuadro 2 se encuentran por debajo de ese límite recomendado.

El bajo tiempo de reverberación observado podría responder a un exceso de absorción acústica dentro de la sala, la cual reduce significativamente la energía del sonido. La presencia de múltiples butacas y sillas tapizadas podría ser un factor importante a considerar en ese sentido, dado que su coeficiente de absorción es bastante alto para todas las bandas de frecuencia. A esto se le suma el alfombrado y las molduras de madera presentes en las barandas de los palcos y de la galería, así como el cielo raso de madera que se encuentra cubierto con pinturas al fresco.

En relación con la claridad, para caracterizar el espacio por medio de este parámetro es necesario evaluar las Ecuaciones 2 y 3 que definen la inteligibilidad de la voz y de la música. En este caso, se utilizan los valores de claridad reportados en el Cuadro 2. Así entonces, en el caso de la inteligibilidad de la voz, se obtiene el siguiente resultado:

$$C_{50(AV)} = 0,15(-0,04) + 0,25(1,69) + 0,35(2,31) + 0,25(6,47)$$

$$C_{50(AV)} = 2,84 \text{ dB}$$

El parámetro $C_{50(AV)}$ se obtiene para medir la inteligibilidad de la palabra en el espacio y se recomienda que su valor sea mayor a 2 dB. En este caso, el resultado es de 2,84 dB, con lo cual se puede concluir que la inteligibilidad de la palabra en el Teatro Nacional es buena. Luego, para el caso de la inteligibilidad de la música, el parámetro $C_{80(AV)}$ sería:

$$C_{80(AV)} = \frac{3,09 + 4,22 + 5,00}{3}$$

$$C_{80(AV)} = 4,10 \text{ dB}$$

Según los valores recomendados para este parámetro, se debería tener un valor de entre 4 dB y 12 dB para salas vacías, por lo que el espacio cumple con los requerimientos para ofrecer una buena inteligibilidad musical. Así mismo, tomando el valor encontrado para el parámetro $C_{80(AV)}$, se observa también que el tipo de música que se verá más beneficiado en este tipo de espacio será la ópera [5].

Con respecto a la definición, y con el fin de determinar qué tan íntima es la sala desde el punto de vista acústico, se busca que los valores obtenidos para el parámetro D50 se encuentren por encima de 70%, para tener una muy buena definición, o bien, por encima de 50% para casos aceptables. Como se observa en el Cuadro 2, los valores de D50 son aceptables, excepto para la banda de 500 Hz donde D50 se encuentra levemente por debajo del valor recomendado.

Para las bandas de altas frecuencias se sobrepasa dicho valor. Dado que la definición evalúa los patrones de las reflexiones dentro de la sala, la escasez de reflexiones tempranas podría estar contribuyendo a la disminución en la calidad de la definición del sonido, en particular, la definición de la voz.

Ahora, para evaluar la respuesta del espacio ante las bajas frecuencias se calcula la calidez acústica por medio de la Ecuación 4, donde el tiempo de reverberación para cada banda de frecuencia se estima por medio del parámetro T30.

$$BR = \frac{1,406 + 1,222}{1,131 + 1,163}$$

$$BR = 1,14$$

El rango óptimo para la calidez son los valores entre 1,10 y 1,45. Para este caso, un valor de 1,14 para el parámetro BR indica que el espacio brindará una adecuada calidez acústica, puesto que se encuentra dentro del rango recomendado. Ahora, considerando el brillo acústico, se evalúa la Ecuación 5, donde se toma también el parámetro T30 como tiempo de reverberación en cada banda de frecuencia, por lo que se obtiene lo siguiente:

$$Br = \frac{1,168 + 1,015}{1,131 + 1,163}$$

$$Br = 0,95$$

En este caso, el valor del brillo acústico obtenido es de 0.95, lo cual muestra un comportamiento adecuado ya que lo recomendado es cualquier valor mayor a 0.87. Por lo tanto, el comportamiento de la sala es el deseado en cuanto a brillo acústico.

Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo resume los resultados obtenidos a partir del análisis de las mediciones acústicas realizadas en la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica. Dichas mediciones permitieron obtener la respuesta impulsional promedio de la sala principal del Teatro Nacional, en formato monoaural y estereofónico, utilizando un parlante de 8 pulgadas como fuente de sonido, así como un micrófono de análisis omnidireccional y un par estéreo formado por dos micrófonos cardiodes.

Posteriormente se obtuvo una serie de parámetros, con los cuales se logró caracterizar la acústica de este espacio, el cual posee una gran importancia para la vida cultural costarricense. Lo anterior permitió analizar aspectos como el tiempo de reverberación, la claridad de la voz y de la música, así como su definición. También se realizó un análisis de la calidez y del brillo acústicos obteniéndose resultados importantes para comprender la forma en la que se propaga el sonido dentro de la sala y la calidad de la experiencia auditiva que el inmueble puede ofrecer a su audiencia.

En general, la sala principal del Teatro Nacional de Costa Rica exhibe indicadores positivos en cuanto a claridad, inteligibilidad de la voz y de la música, calidez y brillo acústicos. En cuanto a su definición, los resultados muestran que el desempeño de la sala es aceptable para las bandas de frecuencia bajas y medias, así como adecuado a altas frecuencias. No obstante, se identificó un desempeño bajo en cuanto al tiempo de reverberación de la sala, que podría disminuir la calidad de la experiencia acústica que ella brinda, sobre todo en espectáculos que involucren interpretaciones musicales. Un exceso de absorción dentro de la sala podría

ser la causa más probable del bajo tiempo de reverberación registrado, por lo que se podría explorar la posibilidad de reducir el tapizado de las barandas o de las sillas, o bien, reducir el uso de alfombrado en la luneta. No obstante, antes de realizar modificaciones mayores en la infraestructura de la sala, se recomienda comparar estos resultados con mediciones realizadas con un parlante dodecaedro como fuente sonora.

Se espera que los resultados obtenidos sean de utilidad para el Teatro Nacional de Costa Rica, sobre todo en lo que respecta a tener una mejor comprensión de la forma en la que se propaga el sonido dentro de él. Así mismo, la investigación realizada constituye un registro digital de las características sonoras del inmueble, con el cual también se pueden realizar auralizaciones y otros efectos de sonido.

En futuras investigaciones se plantea realizar este análisis con una fuente omnidireccional, o bien, con el sistema de sonido propio del Teatro Nacional, para conocer su influencia en la acústica de la sala. Así mismo, se pretende extender el análisis realizado a otros espacios del inmueble, como por ejemplo el foyer, donde también se interpreta música y se realizan representaciones artísticas de gran importancia.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo recibido por parte del personal técnico y administrativo del Teatro Nacional de Costa Rica, así como la apertura y la colaboración brindadas durante la realización de las mediciones en la sala principal.

Referencias

- [1] A. Fischel Volio, "Historia del Teatro Nacional", *Sin Publicar*, 1997.
- [2] A. Ulloa Zamora, "El Teatro Nacional: Apuntes para la Biografía de un Coliseo", *Editorial Costa Rica*, 1972.
- [3] M. Stumpf González, J. Colnaghi y M. Oliveira Nunes, "Análisis acústico del auditorio Padre Werner en Unisinos", *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 33, no. 3, págs. 291-300, 2018.
- [4] International Organization for Standardization, "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters", ISO 3382:1997, 1997, <https://www.iso.org/standard/2354.html>.
- [5] W. M. Leach, "Introduction to electroacoustics and audio amplifier design", 3. Ed, *Van Haren Publishing*, 2003.
- [6] H. Arau, "ABC de la acústica arquitectónica", 1. Ed. *Grupo Editorial CEAC*, 1999.
- [7] A. Carrion Isbert, "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", 1. Ed. Ediciones *Universidad Politécnica de Catalunya*, 1998.
- [8] T. J. Cox y P. D'Antonio, "Engineering art: the science of concert hall acoustics," *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 28, no. 2, págs. 119-129, 2003.
- [9] Hará, R, Iwami, T, y Omoto, A, "Subjective evaluation of auralization using a directional sound source that simulates a trumpet", *Acoustical Science and Technology*, vol. 43, no. 2, 2022.
- [10] Oygo Sound LLC. "Swept-sine analysis". *MATLAB Central File Exchange*, 2023. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29187-swept-sine-analysis>
- [11] Papadakis, N, Serras, A, Stavroulakis, G, "Mimicking the sound field of a dodecahedral loudspeaker by a common directional loudspeaker for reverbeation time measurements", *Actas de la conferencia EURONOISE*, Grecia, 2018.
- [12] OpenAir, "IR Data and Anechoic Data", *University of York*, United Kingdom, 2023. https://www.openair.hosted.york.ac.uk/?page_id=310

Polihidroxicanoatos (PHAs) en bacterias como alternativa ante el aumento de la contaminación ambiental: análisis metabólico y avances en la actualidad

Polyhydroxyalkanoates (PHAs) in bacteria as an alternative to environmental pollution increase: metabolic analysis and current advances

Steven Ceciliano-Castro¹, Daniela Vargas-Morera², Roselind Vargas-Delgado³, Melany Villanueva-Ilama⁴, Dayana Mora-Rodríguez⁵

Fecha de recepción: 22 de febrero, 2023
Fecha de aprobación: 4 de junio, 2023

Ceciliano-Castro, A; Vargas-Morera, D; Vargas-Delgado, R; Villanueva-Ilama, M; Mora-Rodríguez, D. Polihidroxicanoatos (PHAs) en bacterias como alternativa ante el aumento de la contaminación ambiental: análisis metabólico y avances en la actualidad. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 60-69.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6493>

- 1 Estudiante. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: stevenceci858@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0478-6237>
- 2 Estudiante. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: daniela.vm@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5816-3641>
- 3 Estudiante. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: roselind.vargas@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7051-3563>
- 4 Estudiante. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mvillanueva@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5780-6836>
- 5 Estudiante. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: dayanamora1424@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5484-6461>

Palabras clave

Polihidroxicanoatos; plásticos; microorganismos; extracción; biorremediación.

Resumen

Los polihidroxicanoatos (PHA), son plásticos biodegradables sintetizados por una gran variedad de microorganismos y se identifican por compartir características muy similares con los plásticos de origen petroquímico. Estos biopolímeros pueden ser aprovechados para reemplazar materiales de plástico, los mismos que actualmente representan un gran problema de contaminación ambiental al ser poco degradables. Los estudios más recientes, se enfocan en la búsqueda de estrategias de extracción de PHA, empleando la biorremediación en plásticos petroquímicos, combustibles, y en tratamiento de aguas que buscan reducir el impacto de la contaminación ambiental. Todo esto se lleva a cabo mediante reacciones químicas, que las bacterias realizan con las fuentes de carbono, generando PHA mientras se eliminan los desechos contaminantes. La biodegradabilidad es la principal ventaja de estos materiales sintetizados por medio de microorganismos, en comparación con los plásticos convencionales que no poseen esta propiedad. El objetivo de esta revisión es evidenciar la producción de polihidroxicanoatos (PHA), en bacterias como alternativa ante el aumento de la contaminación ambiental.

Keywords

Polyhydroxyalkanoates; plastics; microorganisms; extraction; bioremediation.

Abstract

Polyhydroxyalkanoates (PHA) are biodegradable plastics synthesized by a wide variety of microorganisms and are identified by sharing very similar characteristics with petrochemical plastics. These biopolymers can be used to replace plastic materials, the same ones that currently represent a major environmental pollution problem as they are poorly degradable. The most recent studies focus on the search for PHA extraction strategies, using bioremediation in petrochemical plastics, fuels, and in water treatment that seek to reduce the impact of environmental pollution. All this is carried out through chemical reactions that bacteria carry out with carbon sources, generating PHA while contaminating waste is eliminated. The main advantage of these compared to petroleum-derived plastics is that being produced by microorganisms. The objective of this review is to show the production of polyhydroxyalkanoates in bacteria as an alternative to the increase in environmental pollution.

Introducción

Los plásticos son polímeros de alta demanda en las actividades diarias de la vida humana debido a sus múltiples utilidades, sin embargo, su carácter poco degradable hace que permanezcan mucho tiempo en el medio ambiente, causando problemas a los organismos vivos, al afectar los recursos naturales [1]. Para enfrentar este escenario, se han generado alternativas ambientalmente amigables para reducir su uso hasta sustituirlos. Por ello, los biopolímeros como los polihidroxicanoatos (PHA) se presentan como una opción en auge al adaptarse al principio de la sostenibilidad [2].

Los PHAs son metabolitos secundarios sintetizados y acumulados naturalmente en forma de gránulos por diversos microorganismos, a causa de un exceso de carbono o deficiencia de nutrientes [3]. Al ser biológicamente compatibles, reabsorbibles y degradables [4], sus derivados no presentan ningún efecto negativo sobre el medio ambiente.

Por sus características de interés ambiental, se ha valorado el uso de desechos generados por las industrias como fuente de carbono para la síntesis de este biopolímero al ser más rentables y ecológicos, incluyendo aguas residuales, hidrocarburos, residuos orgánicos u otros [5]. De esta manera, su potencial como agentes biorremediadores es aún más significativo al disminuir los contaminantes que pueden perjudicar el medio ambiente.

La revisión bibliográfica realizada pretende proporcionar información acerca de la caracterización estructural del PHA, sus propiedades y métodos metabólicos realizados en bacterias que conllevan a la síntesis de dichos biopolímeros. Además, se resalta la importancia de su posible aplicación en el sector ambiental como agente purificador de desechos, al actuar sobre las principales fuentes de carbono presente en los residuos generados por la industria humana.

Clasificación de polihidroxicanoatos (PHA)

Los polihidroxicanoatos (PHA), son poliésteres termoplásticos sintetizados por varios microorganismos procarióticos en condiciones de nutrición desequilibradas [4]. Estos poliésteres son biodegradables, y similares a los plásticos sintéticos en cuanto a sus propiedades materialistas [6].

Los PHAs, se clasifican tomando en cuenta la cantidad de átomos de carbono que se encuentran en el monómero incorporado en los polímeros por la longitud de su cadena: el poli (3-hidroxivalerato) y poli (3-hidroxibutirato) pertenecen al grupo de los PHAs de longitud de cadena corta (SCL), estos contienen de 1 a 5 átomos de carbono, además, se caracterizan por ser muy rígidos y carecer de propiedades mecánicas superiores [7]. Los PHAs de longitud de cadena media (MCL), contienen de 6 a 14 átomos de carbono [8], estos tienen una resistencia mecánica, temperatura de transición vítrea y cristalinidad, baja, lo que los convierte en elastoméricos, el poli (3-hidroxiocanoato) es un ejemplo de este grupo [9]. Asimismo, están los PHAs de longitud de cadena larga (LCL), estos tienen más de 14 átomos de carbono, como por ejemplo el poli(3-hidroxipentadecanoato) [8].

Esta clasificación de los PHAs como polímeros de cadena corta, media o larga están asociados con la enzima que realiza la síntesis, debido a que esta contiene una especificidad de sustrato la cual le permite actuar en monómeros que contienen distintos números de átomos de carbono [9].

Al agotarse la fuente de carbono en el medio ambiente, los PHAs actúan como compuestos que suministran almacenamiento y fuente de energía para el organismo [3]. Estos polímeros, cumplen una función importante en la protección de las células cuando estas presenta alto estrés por sal o temperatura [10]. Asimismo, tienen varias funciones relacionadas a la biodegradabilidad, biocompatibilidad, alta resistencia a la tracción y su producción a partir de diversas fuentes renovables [11], siendo estos PHAs inmunológicamente inertes [8].

Cabe resaltar que los PHAs, tienen distintas funciones según su clasificación, por ejemplo, los SCL-PHA, son empleados para generar productos de envasado de alimentos y artículos desechables mientras que, los MCL-PHA, al ser elastómeros se pueden aplicar en suturas quirúrgicas, implantes u otros objetos de interés [12].

Propiedades fisicoquímicas de los PHAs

Propiedades termales

Al ser parcialmente cristalinos, se utiliza la temperatura de transición vítrea (T_g), y la temperatura de fusión (T_m), para estudiar las propiedades térmicas de la fase amorfa y la fase cristalina respectivamente [13]. Se ha demostrado que la T_m de los PHAs, es directamente proporcional con el número de átomos de carbono de la cadena lateral, mientras que la T_g es inversamente proporcional, a la misma característica [14].

Propiedades mecánicas

Esta propiedad varía dependiendo de la longitud de la cadena del polímero, para PHA de cadena corta (SCL), se establece que son frágiles y altamente cristalinos, mientras que los PHA de cadena media (MCL) son más flexibles y elásticos [14].

Cristalinidad

Los PHA pueden cristalizar en diferentes modificaciones cristalinas, de forma similar a otros poliésteres [15]. El aumento en la longitud de las cadenas laterales puede causar una inhibición de la propiedad cristalizante, se ha reportado que dicha propiedad en MCL es más baja que en SCL [16].

Biodegradabilidad

Los PHA son biodegradables en ambientes naturales, pero la efectividad de este proceso depende de factores como la composición de las comunidades microbianas, esto porque los microorganismos sintetizan enzimas extracelulares como PHA hidrolasas que actúan específicamente sobre el PHA y degradan el biopolímero [17]. Sumado a esto el pH, la temperatura, humedad, disponibilidad de oxígeno y nutrientes también pueden ser determinantes en este proceso [18].

Principales rutas metabólicas para la síntesis de PHAs

Para la producción de estos biopolímeros, se activan distintas rutas metabólicas que cambian significativamente según los diferentes grupos de microorganismos. Los PHA se sintetizan en fases de crecimiento microbiano estacionarias con condiciones de crecimiento favorable, y exponenciales, en la cual presentan limitaciones de nutrientes y fuentes de carbono en exceso, lo que conduce a la síntesis y acumulación de PHA [6].

Los PHA se pueden sintetizar completamente utilizando varios microorganismos, como bacterias gram-positivas y gram-negativas, levaduras, hongos y algas, además dicha síntesis se lleva a cabo por medio de tres principales rutas metabólicas [19].

En la ruta I, se inicia con la transformación del azúcar en acetil-CoA, seguido de la condensación bimolecular de dos moléculas de acetil-CoA y la formación de acetoacetil-CoA por acción de la β -cetotiolasa [6]. Posteriormente, el acetoacetil-CoA se reduce a 3-hidroxiacetil-CoA mediante la enzima NADPH-acetoacetil-CoA reductasa; seguido por la acción de la PHA sintasa, finalmente se reduce a los respectivos PHA al catalizar la formación de enlaces éster en 3-hidroxiacetil-CoA para generar poli (3HB) [7]. Se informó que *Ralstonia eutropha* sintetiza PHA siguiendo esta vía [20].

La ruta II de la síntesis de PHA en los microorganismos utiliza los ácidos grasos [21]. En este proceso se lleva a cabo la β -oxidación de los ácidos grasos y el acil-CoA generado se encarga de sintetizar los monómeros de PHA. En esta ruta intervienen enzimas como la

3-cetoacil-CoA reductasa, epimerasa, (*R*)-enoil-CoA hidratasa/enoil-CoA hidratasa I, acil-CoA oxidasa (putativo). En este caso, la molécula de 3-hidroxiacil-CoA funciona como una molécula precursora para la síntesis de PHA [22]. Un ejemplo de microorganismo que sintetiza MCL-PHA por esta vía es *Pseudomonas putida* [23].

Finalmente, en la vía III se requiere de dos enzimas esenciales, la 3-hidroxiacil-ACP-CoA transferasa (PhaG) y la malonil-CoA-ACP transacilasa (FabD). Estas enzimas se encargan de suministrar el precursor (3-hidroxiacil-ACP), que luego se convierte en 3-hidroxiacil-CoA. En el siguiente paso, este producto es catalizado por la PHA sintasa para finalmente producir PHA [24]. Se ha encontrado que *Pseudomonas mendocina* produce PHA por medio de esta ruta [25].

Biorremediación y reducción de producción de plásticos petroquímicos

La gestión de residuos sólidos es el principal problema para el medio ambiente a causa de los plásticos petroquímicos, producidos por sustancias mediante la refinación del petróleo y su transformación, que se requieren estrictamente como materia prima en la industria [26].

Se han implementado alternativas como los polihidroxicanoatos (PHA) en bacterias ante el aumento de la contaminación ambiental debido a sus ventajas ecológicas como ser completamente biodegradables, el cual puede ser empleado así en la industria para sustituir los plásticos petro-plásticos, debido a su claro impacto en los ecosistemas [27]. Asociado a esto, la biorremediación se presenta como una estrategia fisicoquímica innovadora para evitar el daño y la contaminación del suelo basado en la acción de estas bacterias que pueden degradar de forma natural ciertos contaminantes al metabolizarlos [28].

Las bacterias de la familia halófilas extremas, se caracterizan por su capacidad de acumular grandes cantidades de PHAs, en sustratos simples, con fuentes de carbono económicas o residuos industriales, y además de ello por ser filogenéticamente diversas incluyendo bacterias gram-positivas y gram-negativas, y alguna de ellas metanogénicas [29]. Las mismas se caracterizan, por habitar en sitios de alta salinidad con zonas que se ubican en lugares secos y calientes [29]. Ecosistemas con estas características pueden haber en cualquier punto del mundo, así que se dice, que corresponden a cosmopolitas sin cierta restricción de distribución según la especie, con algunos ejemplos de hábitats como los lagos, mares y suelos salados [30].

La salinidad en la que se desarrollan y sintetizan los PHAs, disminuye los problemas de esterilidad por las características de los contaminantes y su fuente durante el proceso de biorremediación, con una reducción de los costos de producción [31]. De esta manera, se han utilizado para generar biopolímeros, mismos que a la vez funcionan en la industria, para ejercer labores de biorremediación y restauración ecológica en ecosistemas altamente dañados. Esto gracias a su capacidad para remover residuos tóxicos de aguas residuales hipersalinas, como se presenta en fábricas de agroquímicos, farmacéuticos y extracción de petróleo [32].

La bacteria es capaz de producir PHAs como parte de su mecanismo de biorremediación al mantener intracelularmente una reserva de carbono y energía a partir de materia contaminante [33]. Además, su gran impacto ecológico se asocia con la aceleración de procesos en la industria de descontaminación debido a sus enzimas hidrolíticas, que se pueden usar como biocatalizadores, mismos que demuestran que las bacterias halófilas, son una alternativa para extraer compuestos de ambientes contaminados [34]. Las bacterias tienen el potencial de degradar hidrocarburos y materia orgánica de aguas residuales para lograr disminuir el impacto en los sitios contaminados [35], como se expone seguidamente.

Producción de PHAs a partir de hidrocarburos

La biorremediación de combustibles es una solución para una de las peores contaminaciones a nivel mundial en el medio ambiente [36]. Los derrames de combustible pueden ocurrir en las actividades diarias de diversos sectores, como el transporte, zonas industriales y demás [37]. Dicho proceso, se realiza tras un análisis inicial del escenario, el tipo de hidrocarburo, del terreno, bacteria a utilizar, y por último la población afectada junto con los estudios técnicos de su alcance hidrogeológico de acuerdo al tipo de suelo [38]. Esta es una solución segura por sus ventajas ante el tratamiento de derrame de hidrocarburos para suelos y aguas contaminadas, al mantener la seguridad de los ecosistemas y la salud humana por su poca perturbación, lo que la hace ideal para el rejuvenecimiento sostenible del suelo para integrarlo al medio ambiente [39].

Se han encontrado géneros bacterianos como; el *Bacillus* y *Pseudomonas*, grandes productoras de polihidroxialcanoatos [40], capaces de actuar sobre compuestos orgánicos y generar biopolímeros [41]. *Bacillus*, se conforma de bacterias que se caracterizan por su capacidad hidrolítica con enzimas que actúan sobre hidrocarburos produciendo PHAs de forma rentable [42]. Para lograr aislar las mejores cepas de bacteria se han trabajado constantemente en técnicas fenotípicas y moleculares [43]. Las bacterias pueden utilizar distintos desechos como materia prima para producir polihidroxialcanoatos, sin embargo, los más utilizados son los de industrias lácteas, de aceites, y la agroindustria [44]. Además, pueden ser encontradas en diversos hábitats, tanto ecosistemas acuáticos como terrestres, contando así con funciones ampliamente usadas para la síntesis por su adaptabilidad a cualquier tipo de ambiente [42].

La bioacumulación, basada en la incorporación de los metales pesados al interior de las células de biomasa viva y la biosorción, en el cual los iones metálicos permanecen en la superficie celular por diferentes mecanismos, caracterizan a dichas bacterias [45]. Por ello, se establece su gran impacto positivo en la correlación existente entre industria y el medio ambiente, dado la capacidad de *Bacillus* de eliminar desechos fósiles [41].

Los métodos de extracción de estos biopolímeros se basan en procesos como la precipitación, coagulación, intercambio iónico, ósmosis inversa, adsorción así como el uso de membranas [46]. No obstante, llegan a ser tediosos y costosos, esto si se aplican en sustratos altamente contaminados en términos de reactivos químicos utilizados, y en energía requerida para aplicarlo. Es por ello que los microorganismos se han presentado como otra opción más factible, ya que pueden inmovilizar esos compuestos sólidos [47].

Tratamiento de aguas residuales para generar PHAs

Las aguas residuales representan un problema grave para la salud de la población y el medio ambiente, al trasladar muchos tipos de contaminantes, según su origen, asociados a patógenos, metales pesados, excesos de materia orgánica, productos de cuidado personal y de limpieza, agroquímicos, medicamentos, entre muchos otros [48]. Grandes volúmenes de estos son generados diariamente debido a la degradación constante de los recursos hídricos explotados a causa del mal uso de la tierra por la expansión de actividades agrícolas, industriales o turísticas; relacionadas a estos el aumento exponencial de la población [49].

Muchos métodos han sido aplicados para el tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, resulta complicado brindar un tratamiento adecuado debido a la naturaleza compleja de los efluentes producidos, donde los gastos son más altos que las ganancias producidas [50]. Tomando en cuenta que estas aguas negras están enriquecidas con varios nutrientes orgánicos e inorgánicos se encontró la aplicación de crecimiento bacteriano como agente purificador del agua [51]. Con la producción y extracción de PHA de dichas corrientes contaminadas como

sustrato, se destaca su aporte ambiental y la potencialidad de producción de bioplásticos, al permitir un mayor control de las biomásas con una valorización del ciclo de las aguas residuales dentro de un enfoque de economía circular [52].

Especies de bacterias como *Serratia* sp. han demostrado su potencial de eliminación de contaminantes de aguas residuales donde los PHA producidos alcanzan el 51% en el peso seco de sus células, asociado al consumo de ácidos grasos como medio metabólico principal [51]. Por su parte, *Azotobacter vinelandii* produjo hasta un 58% de PHA al utilizar aguas residuales porcinas como medio de crecimiento [53], donde sus fuentes de carbono son principalmente azúcares como la glucosa [54].

El proceso de extracción permanece como uno de los aspectos limitantes de la producción de PHA, y en aguas residuales se mantiene un consumo importante de reactivos y pretratamientos de las fuentes utilizadas para obtener un grado de pureza necesario para las industrias que lo utilizan [52]. El uso de aguas contaminadas como sustrato requiere de tratamientos previos para obtener mejores resultados de recuperación, al contener muchos tipos de sustancias sólidas que pueden afectar la calidad de los polímeros [55]. La coagulación o floculación se considera el método más apropiado para removerlos, con quitosano, haba o frijol común [56].

Se ha encontrado que métodos como la flotación, un mecanismo fisicoquímico de separación, es ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales por su eficiencia [57], asociada a la poca cantidad de desechos producidos en comparación con otros tratamientos como los surfactantes [58]. Esta se caracteriza por ser un proceso de disrupción celular o extracción por solvente donde las células microbianas se tratan a 30°C con cloroformo durante 72hrs. Posteriormente, la mezcla se mantiene a temperatura ambiente durante 12 h para la separación de los restos celulares por autoflotación. Este método ha mostrado hasta un 85 % (p/p) de peso seco celular que alcanza concentraciones de PHA puros de hasta un 98% [53].

Conclusión

La producción de polihidroxicanoatos destaca como una alternativa de explotación para la sustitución de plásticos petroquímicos debido a sus beneficios. Sin embargo, los desafíos para poder garantizar una producción sostenible de PHA, se encuentran en los costos de la fuente de carbono, así como la mejora de la producción y la eficiencia de extracción.

Los PHAs se pueden sintetizar utilizando varios microorganismos, recalando la acción de las bacterias, las cuales siguen distintas rutas según su sustrato. Por ejemplo, las especies de bacterias como *Serrani* sp. y *Azotobacter vinelandii*, presentan rutas metabólicas asociadas al consumo de ácidos grasos, mientras que la segunda presenta una fuente de carbono principalmente de azúcares. Esto es importante para saber qué tipo de cepas utilizar en cada tipo de sustrato específico, para obtener un mejor rendimiento en la obtención de biopolímeros.

La aplicación de subproductos de desecho generados por la contaminación se establece como el camino a seguir en los procesos de producción de PHA, directamente relacionado a una sociedad donde conforme aumenta la población los desechos generados son cada vez mayores. Utilizar fuentes de carbono como aguas residuales o hidrocarburos no sólo disminuirá los costos de producción, sino que también concluye de forma exitosa el ciclo de consumo de materiales empleados en los tratamientos de desechos o biorremediación, siendo así uno de los pilares fundamentales del cumplimiento de la economía circular.

Referencias

- [1] L. Lebreton y A. Andrady, «Future scenarios of global plastic waste generation and disposal», *Palgrave Commun*, vol. 5, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2019, doi: 10.1057/s41599-018-0212-7.

- [2] T. Pittmann y H. Steinmetz, «Polyhydroxyalkanoate Production on Waste Water Treatment Plants: Process Scheme, Operating Conditions and Potential Analysis for German and European Municipal Waste Water Treatment Plants», *Bioengineering (Basel)*, vol. 4, n.º 2, p. 54, jun. 2017, doi: 10.3390/bioengineering4020054.
- [3] A. B. Akinmulewo y O. C. Nwinyi, «Polyhydroxyalkanoate: a biodegradable polymer (a mini review)», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1378, n.º 4, p. 042007, dic. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1378/4/042007.
- [4] S. Riaz, K. Y. Rhee, y S. J. Park, «Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Biopolymers for Biofuel and Biorefineries», *Polymers*, vol. 13, n.º 2, Art. n.º 2, ene. 2021, doi: 10.3390/polym13020253.
- [5] R. G. Saratale *et al.*, «A comprehensive overview and recent advances on polyhydroxyalkanoates (PHA) production using various organic waste streams», *Bioresource technology*, vol. 325, p. 124685, 2021.
- [6] S. Behera, M. Priyadarshane, Vandana, y S. Das, «Polyhydroxyalkanoates, the bioplastics of microbial origin: Properties, biochemical synthesis, and their applications», *Chemosphere*, vol. 294, p. 133723, may 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133723.
- [7] V. Sharma, R. Sehgal, y R. Gupta, «Polyhydroxyalkanoate (PHA): Properties and Modifications», *Polymer*, vol. 212, p. 123161, ene. 2021, doi: 10.1016/j.polymer.2020.123161.
- [8] B. Bhattacharyya, H. T. Behera, A. Mojumdar, V. Raina, y L. Ray, «Polyhydroxyalkanoates: Resources, Demands and Sustainability», en *Soil Microenvironment for Bioremediation and Polymer Production*, John Wiley & Sons, Ltd, 2019, pp. 253-270. doi: 10.1002/9781119592129.ch14.
- [9] R. Dwivedi, R. Pandey, S. Kumar, y D. Mehrotra, «Poly hydroxyalkanoates (PHA): Role in bone scaffolds», *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, vol. 10, n.º 1, pp. 389-392, ene. 2020, doi: 10.1016/j.jobcr.2019.10.004.
- [10] R. Mitra, T. Xu, H. Xiang, y J. Han, «Current developments on polyhydroxyalkanoates synthesis by using halophiles as a promising cell factory», *Microbial Cell Factories*, vol. 19, n.º 1, p. 86, abr. 2020, doi: 10.1186/s12934-020-01342-z.
- [11] P. Tyagi y A. Sharma, «Utilization of crude paper industry effluent for Polyhydroxyalkanoate (PHA) production», *Environmental Technology & Innovation*, vol. 23, p. 101692, ago. 2021, doi: 10.1016/j.eti.2021.101692.
- [12] C. Kourmentza *et al.*, «Recent Advances and Challenges towards Sustainable Polyhydroxyalkanoate (PHA) Production», *Bioengineering*, vol. 4, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2017, doi: 10.3390/bioengineering4020055.
- [13] M. E. Grigore, R. M. Grigorescu, L. Iancu, R.-M. Ion, C. Zaharia, y E. R. Andrei, «Methods of synthesis, properties and biomedical applications of polyhydroxyalkanoates: a review», *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, vol. 30, n.º 9, pp. 695-712, jun. 2019, doi: 10.1080/09205063.2019.1605866.
- [14] S. Gopi, M. Kontopoulou, B. A. Ramsay, y J. A. Ramsay, «Manipulating the structure of medium-chain-length polyhydroxyalkanoate (MCL-PHA) to enhance thermal properties and crystallization kinetics», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 119, pp. 1248-1255, nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.08.016.
- [15] M. Eesaee, P. Ghassemi, D. D. Nguyen, S. Thomas, S. Elkoun, y P. Nguyen-Tri, «Morphology and crystallization behaviour of polyhydroxyalkanoates-based blends and composites: A review», *Biochemical Engineering Journal*, p. 108588, ago. 2022, doi: 10.1016/j.bej.2022.108588.
- [16] C. Sanhueza, F. Acevedo, S. Rocha, P. Villegas, M. Seeger, y R. Navia, «Polyhydroxyalkanoates as biomaterial for electrospun scaffolds», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 124, pp. 102-110, mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.11.068.
- [17] L. S. Dilkes-Hoffman, P. A. Lant, B. Laycock, y S. Pratt, «The rate of biodegradation of PHA bioplastics in the marine environment: A meta-study», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 142, pp. 15-24, may 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.03.020.
- [18] M. Fernandes, A. Salvador, M. M. Alves, y A. A. Vicente, «Factors affecting polyhydroxyalkanoates biodegradation in soil», *Polymer Degradation and Stability*, vol. 182, p. 109408, dic. 2020, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109408.
- [19] N. n. n. Anitha y R. K. Srivastava, «Microbial Synthesis of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) and Their Applications», en *Environmental and Agricultural Microbiology*, John Wiley & Sons, Ltd, 2021, pp. 151-181. doi: 10.1002/9781119525899.ch7.
- [20] M. Raberg, E. Volodina, K. Lin, y A. Steinbüchel, «Ralstonia eutropha H16 in progress: Applications beside PHAs and establishment as production platform by advanced genetic tools», *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 38, n.º 4, pp. 494-510, may 2018, doi: 10.1080/07388551.2017.1369933.
- [21] S. Chavan, B. Yadav, R. D. Tyagi, y P. Drogui, «A review on production of polyhydroxyalkanoate (PHA) biopolyesters by thermophilic microbes using waste feedstocks», *Bioresource Technology*, vol. 341, p. 125900, dic. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125900.

- [22] M. Palencia, T. A. Lerma, V. Garcés, M. A. Mora, J. M. Martínez, y S. L. Palencia, «Chapter 6 - Polymer biosynthesis and biotransformations», en *Eco-friendly Functional Polymers*, M. Palencia, T. A. Lerma, V. Garcés, M. A. Mora, J. M. Martínez, y S. L. Palencia, Eds. Elsevier, 2021, pp. 89-104. doi: 10.1016/B978-0-12-821842-6.00029-4.
- [23] S. H. Mohammad y B. Bhukya, «Biotransformation of toxic lignin and aromatic compounds of lignocellulosic feedstock into eco-friendly biopolymers by *Pseudomonas putida* KT2440», *Bioresource Technology*, vol. 363, p. 128001, nov. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128001.
- [24] X. Zhang, Y. Lin, Q. Wu, Y. Wang, y G.-Q. Chen, «Synthetic Biology and Genome-Editing Tools for Improving PHA Metabolic Engineering», *Trends in Biotechnology*, vol. 38, n.º 7, pp. 689-700, jul. 2020, doi: 10.1016/j.tibtech.2019.10.006.
- [25] F. Zhao *et al.*, «Metabolic engineering of *Pseudomonas mendocina* NK-01 for enhanced production of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates with enriched content of the dominant monomer», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 154, pp. 1596-1605, jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.044.
- [26] H.-K. Lee, S. Chang, W. Park, T.-J. Kim, S. Park, y H. Jeon, «Effective treatment of uranium-contaminated soil-washing effluent using precipitation/flocculation process for water reuse and solid waste disposal», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 48, p. 102890, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102890.
- [27] D. Kucera *et al.*, «Characterization of the promising poly(3-hydroxybutyrate) producing halophilic bacterium *Halomonas halophila*», *Bioresource Technology*, vol. 256, pp. 552-556, may 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.02.062.
- [28] I. Ihsanullah, A. Jamal, M. Ilyas, M. Zubair, G. Khan, y M. A. Atieh, «Bioremediation of dyes: Current status and prospects», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 38, p. 101680, dic. 2020, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101680.
- [29] G. Gecim, G. Aydin, T. Tavsanoğlu, E. Erkoç, y A. Kalemtaş, «Review on extraction of polyhydroxyalkanoates and astaxanthin from food and beverage processing wastewater», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, p. 101775, abr. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101775.
- [30] S. F. Corsino, M. Capodici, M. Torregrossa, y G. Viviani, «A comprehensive comparison between halophilic granular and flocculent sludge in withstanding short and long-term salinity fluctuations», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 22, pp. 265-275, abr. 2018, doi: 10.1016/j.jwpe.2018.02.013.
- [31] W. T. Pecher *et al.*, «Effects of road salt on microbial communities: Halophiles as biomarkers of road salt pollution», *PLOS ONE*, vol. 14, n.º 9, p. e0221355, sep. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0221355.
- [32] F. L. Martínez, «Caracterización genética y bioquímica de microorganismos relacionados al metabolismo del litio en aguas y suelos del NOA», mar. 2019, Accedido: 4 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/80288>
- [33] A.-D.-P. Flores Vásquez, E.-I. Idrogo, y C. R. Carreño Farfán, «Rendimiento de polihidroxialcanoatos (PHA) en microorganismos halófilos aislados de salinas», *Revista Peruana de Biología*, vol. 25, n.º 2, pp. 153-160, abr. 2018, doi: 10.15381/rpb.v25i2.14249.
- [34] F. A. El-malek, A. Farag, S. Omar, y H. Khairy, «Polyhydroxyalkanoates (PHA) from *Halomonas pacifica* ASL10 and *Halomonas salifodiane* ASL11 isolated from Mariout salt lakes», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 161, pp. 1318-1328, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.07.258.
- [35] M. T. Jamal y A. Pugazhendi, «Degradation of petroleum hydrocarbons and treatment of refinery wastewater under saline condition by a halophilic bacterial consortium enriched from marine environment (Red Sea), Jeddah, Saudi Arabia», *3 Biotech*, vol. 8, n.º 6, p. 276, may 2018, doi: 10.1007/s13205-018-1296-x.
- [36] V. R. Ribeiro *et al.*, «The use of microalgae-microbial fuel cells in wastewater bioremediation and bioelectricity generation», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 48, p. 102882, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102882.
- [37] P. R. Sreedevi, K. Suresh, y G. Jiang, «Bacterial bioremediation of heavy metals in wastewater: A review of processes and applications», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 48, p. 102884, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102884.
- [38] V. K. Nguyen, D. D. Nguyen, M.-G. Ha, y H. Y. Kang, «Potential of versatile bacteria isolated from activated sludge for the bioremediation of arsenic and antimony», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 39, p. 101890, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101890.
- [39] P. Bhatt, A. Sharma, E. R. Rene, A. J. Kumar, W. Zhang, y S. Chen, «Bioremediation of fipronil using *Bacillus* sp. FA3: Mechanism, kinetics and resource recovery potential from contaminated environments», *Journal of Water Process Engineering*, vol. 39, p. 101712, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101712.

- [40] K. Priyanka, M. Umesh, B. Thazeem, y K. Preethi, «Polyhydroxyalkanoate biosynthesis and characterization from optimized medium utilizing distillery effluent using *Bacillus endophyticus* MTCC 9021: a statistical approach», *Biocatalysis and Biotransformation*, vol. 39, n.º 1, pp. 16-28, ene. 2021, doi: 10.1080/10242422.2020.1789112.
- [41] S. H. Kee *et al.*, «A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants», *Fuel*, vol. 321, p. 124039, ago. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124039.
- [42] S. Mohapatra *et al.*, «Bacillus and biopolymer: Prospects and challenges», *Biochemistry and Biophysics Reports*, vol. 12, pp. 206-213, dic. 2017, doi: 10.1016/j.bbrep.2017.10.001.
- [43] E. M. da S. Montenegro, G. S. Delabary, M. A. C. da Silva, F. D. Andreote, y A. O. de S. Lima, «Molecular Diagnostic for Prospecting Polyhydroxyalkanoate-Producing Bacteria», *Bioengineering (Basel)*, vol. 4, n.º 2, p. E52, may 2017, doi: 10.3390/bioengineering4020052.
- [44] A. J. Cal *et al.*, «Production of polyhydroxyalkanoate copolymers containing 4-hydroxybutyrate in engineered *Bacillus megaterium*», *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 168, pp. 86-92, ene. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.015.
- [45] A. Fakhar *et al.*, «Heavy metal remediation and resistance mechanism of *Aeromonas*, *Bacillus*, and *Pseudomonas*: A review», *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 52, n.º 11, pp. 1868-1914, jun. 2022, doi: 10.1080/10643389.2020.1863112.
- [46] H. S. Al-Battashi *et al.*, «Lignocellulosic biomass (LCB): a potential alternative biorefinery feedstock for polyhydroxyalkanoates production», *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 18, n.º 1, pp. 183-205, mar. 2019, doi: 10.1007/s11157-018-09488-4.
- [47] J. Y. Boey, L. Mohamad, Y. S. Khok, G. S. Tay, y S. Baidurah, «A Review of the Applications and Biodegradation of Polyhydroxyalkanoates and Poly(lactic acid) and Its Composites», *Polymers*, vol. 13, n.º 10, Art. n.º 10, ene. 2021, doi: 10.3390/polym13101544.
- [48] N. Ungureanu, V. Vlăduț, y G. Voicu, «Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation», *Sustainability*, vol. 12, n.º 21, Art. n.º 21, ene. 2020, doi: 10.3390/su12219055.
- [49] M. J. López-Serrano, J. F. Velasco-Muñoz, J. A. Aznar-Sánchez, y I. M. Román-Sánchez, «Sustainable Use of Wastewater in Agriculture: A Bibliometric Analysis of Worldwide Research», *Sustainability*, vol. 12, n.º 21, Art. n.º 21, ene. 2020, doi: 10.3390/su12218948.
- [50] G. Crini y E. Lichtfouse, «Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment», *Environ Chem Lett*, vol. 17, n.º 1, pp. 145-155, mar. 2019, doi: 10.1007/s10311-018-0785-9.
- [51] A. Gupta, M. Kumar, y I. S. Thakur, «Analysis and optimization of process parameters for production of polyhydroxyalkanoates along with wastewater treatment by *Serratia* sp. ISTVKR1», *Bioresource Technology*, vol. 242, pp. 55-59, oct. 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.03.110.
- [52] S. Palmieri *et al.*, «Effects of different pre-treatments on the properties of polyhydroxyalkanoates extracted from sidestreams of a municipal wastewater treatment plant», *Science of The Total Environment*, vol. 801, p. 149633, 2021.
- [53] M. Kumar *et al.*, «Bacterial polyhydroxyalkanoates: Opportunities, challenges, and prospects», *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121500, 2020.
- [54] P.-S. Mok, J.-A. Chuah, N. Najimudin, P.-W.-Y. Liew, B.-C. Jong, y K. Sudesh, «In Vivo Characterization and Application of the PHA Synthase from *Azotobacter vinelandii* for the Biosynthesis of Polyhydroxyalkanoate Containing 4-Hydroxybutyrate», *Polymers (Basel)*, vol. 13, n.º 10, p. 1576, may 2021, doi: 10.3390/polym13101576.
- [55] D. Meng *et al.*, «Production of polyhydroxyalkanoates from propylene oxide saponification wastewater residual sludge using volatile fatty acids and bacterial community succession», *Bioresource Technology*, vol. 329, p. 124912, 2021.
- [56] A. D. Tripathi *et al.*, «Production of polyhydroxyalkanoates using dairy processing waste—a review», *Bioresource Technology*, vol. 326, p. 124735, 2021.
- [57] G. Mannina, D. Presti, G. Montiel-Jarillo, J. Carrera, y M. E. Suárez-Ojeda, «Recovery of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from wastewater: A review», *Bioresource technology*, vol. 297, p. 122478, 2020.
- [58] G. Pagliano, P. Galletti, C. Samori, A. Zaghini, y C. Torri, «Recovery of Polyhydroxyalkanoates From Single and Mixed Microbial Cultures: A Review», *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 9, 2021, Accedido: 6 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.624021>

Caracterización de las tecnologías de secuenciación genética de segunda y tercera generación

Characterization of second- and third-generation genomic sequencing technologies

Dorian Rojas-Villalta¹, Daniela Benavides-Villegas², Belén Angulo-Hidalgo³, Luis Muñoz-Solórzano⁴, Chiara Consumi-Tubito⁵

Fecha de recepción: 22 de febrero, 2023

Fecha de aprobación: 27 de junio, 2023

Rojas-Villalta, D; Benavides-Villegas, D; Angulo-Hidalgo, B; Muñoz-Solórzano, L; Consumi-Tubito, C. Caracterización de las tecnologías de secuenciación genética de segunda y tercera generación. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 70-81.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6494>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rojasvillaltadorian@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-2939-1485>
Autor de correspondencia
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: elabenavides.v@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-4649-4101>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mangulobelen08@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-8421-9514>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: luchomusol@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-6960-377X>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: chiaraconsumi@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-3256-1975>

Palabras clave

Illumina; Oxford Nanopore; PacBio; plataformas de secuenciación; bioinformática.

Resumen

El avance en la secuenciación de material genético ha favorecido el estudio de nuevas áreas de investigación relacionadas a la genómica, transcriptómica y demás ciencias -ómicas. Esto creó la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías más accesibles y eficientes, como las tecnologías de segunda y tercera generación. Por ello, esta revisión caracterizó las principales metodologías de secuenciación de segunda y tercera generación. Las tecnologías de segunda generación se ven representadas por la secuenciación por síntesis fragmentos cortos con alta calidad y precisión. En la tercera generación se especializan en lecturas largas secuenciadas por nanoporos y secuenciación de una sola molécula en tiempo real. Las empresas Illumina y PacBio poseen una mayor calidad y precisión en las lecturas, en comparación a Oxford Nanopore Technologies (ONT). Sin embargo, las lecturas de ONT solucionan problemas del ensamblaje genómico propios de lecturas cortas. Todas las tecnologías analizadas poseen secuenciadores para proyectos de producción a escala; Illumina y ONT también poseen secuenciadores sobremesa, y solamente la última presenta dispositivos portátiles. Con respecto a la accesibilidad, los países centroamericanos poseen poca cobertura por parte de estas empresas, siendo Illumina la única con una distribuidora radicada en la región. Cada tecnología de secuenciación posee ventajas y desventajas asociadas, lo cual impulsa a su uso en conjunto, lo que permite análisis más convenientes y completos. Por lo cual el desarrollo de nuevos programas bioinformáticos para la mejora del análisis corresponde a consideraciones que deben ser abordadas con la intención de fortalecer el uso de las técnicas de secuenciación.

Keywords

Illumina; Oxford Nanopore; PacBio; sequencing platforms; bioinformatics.

Abstract

The progress in genetic material sequencing enhanced diverse research opportunities related to genomics, transcriptomics and other -omics areas. A need in the development of more accessible and efficient techniques resulted in the second- (NGS) and third-generation technologies (TGS). In this paper we aimed to characterize the main sequencing methods of second- and third-generation. NGS technology is based on the sequencing by biosynthesis of short fragments with high quality and precision, while TGS are specialized in long fragment sequencing by nanopores and single-molecule, real-time technologies. Illumina and PacBio have more precise and high-quality data, compared to Oxford Nanopore Technologies (ONT). However, nanopores long reads address errors in genome assembly, commonly associated with small lectures. All analyzed technologies have production-scale sequencers, but only ONT and Illumina developed benchtop products. ONT also presents portable sequencers for small projects. Latinoamerican countries have less coverage and technical support of sequencing technologies, and only Illumina is sited in this region. Each sequencing technology have advantages and limitations regarding their techniques and their coupled use is promoted to make a deeper analysis of the data, therefore the development of new bioinformatics programs remain as one of the principal obstacles to overcome to enhance the application of these technologies.

Introducción

Posterior al desarrollo de la metodología de secuenciación de Frederick Sanger [1], se ha incentivado el crecimiento de la genómica y demás ciencias -ómicas. La secuenciación de Sanger consiste en el uso de didesoxinucleótidos (ddNTPs); análogos químicos de los nucleótidos sin el grupo hidroxilo en el extremo 3', lo cual inhibe la extensión de la cadena de ADN en la replicación [2]. Esta técnica emplea una combinación de cada ddNTP individual marcado radioactivamente junto a nucleótidos tradicionales, permitiendo el alargamiento de la cadena de ADN hasta la incorporación de un ddNTP; los resultados son analizados por medio de electroforesis capilar para determinar la secuencia según las distancias de corrida [1].

En 1990, la técnica de Sanger fue automatizada y utilizada para la secuenciación del genoma humano, como parte del Proyecto del Genoma Humano (HGP, por sus siglas en inglés), el cual se finalizó en el 2001 [3]. Los resultados obtenidos favorecieron a la identificación de alelos deficientes asociados a enfermedades como la fibrosis quística, lo que permitió enfocar investigaciones al desarrollo de su tratamiento [4]. En la actualidad, el genoma humano sigue siendo actualizado agregando zonas de heterocromatina y otras regiones cromosómicas no representadas en el primer genoma de referencia, desbloqueando nuevas secuencias para estudios funcionales [5].

En este sentido, el desarrollo de las diferentes ciencias -ómicas ha tenido múltiples aplicaciones como la caracterización y entendimiento de las rutas metabólicas para la manipulación y mejoramiento genético, planteamiento de plataformas industriales de biomanufactura, detección de predisposiciones genéticas, procesos fisiopatológicos y epidemiología de enfermedades, entre otras [6]–[8]. Dada su aplicabilidad en diversos aspectos, el desarrollo de nuevas tecnologías de menor costo y mayor eficiencia ha sido uno de los principales enfoques recientes, llevando a las siguientes generaciones en técnicas de secuenciación [9].

La primera generación consiste en la secuenciación de Sanger y Maxam Gilbert; la segunda generación o *next generation sequencing* (NGS) engloba técnicas de empresas como Illumina Inc., principalmente. Finalmente, la secuenciación de tercera generación se relaciona con los sistemas de empresas como Pacific Biosciences (PacBio) y Oxford NanoPore Technologies Inc. (ONT) [9]. En esta revisión se analiza y compara las principales metodologías de secuenciación de segunda y tercera generación, describiendo su fundamento bioquímico, aspectos de lectura, dispositivos y accesibilidad.

Tecnologías de Secuenciación

La secuenciación genética consiste en la determinación de la secuencia de nucleótidos de secciones de material genético [9]. Cada tecnología de secuenciación bajo su propio mecanismo bioquímico da lugar a lecturas de información (*reads*), que reflejan los resultados de la secuenciación [10]. Estos resultados consisten en un conjunto complejo de múltiples caracteres que son transformados y analizados posteriormente mediante programas bioinformáticos [11]. Asimismo, la información generada se interpreta de diferente manera según el objetivo del estudio, ya sea en metagenómica, transcriptómica o secuenciación de genomas completos.

Se han desarrollado gran variedad de interfaces para el análisis, organización y visualización de los resultados de secuenciación. Programas como NanoPlot y FastQC generan resúmenes y representaciones gráficas de los datos. NanoPlot se emplea en el procesamiento de secuencias de lectura larga [12], mientras que FastQC se utiliza para lecturas cortas [13].

Asimismo, los resultados de una secuenciación conllevan un proceso de recorte genómico (*genomic trimming*); el cual consiste en una eliminación de lecturas de baja calidad o longitud indeseada [14]. Para ensamblar los genomas se emplean plataformas como Unicycler [15], que

realizan el acomodamiento de las lecturas cortas y largas para la generación de un archivo con el genoma completo en formato fasta; este ensamblaje se puede realizar *de novo* o mediante un genoma de referencia. Una vez obtenido el genoma, este puede analizarse de diversas formas dependiendo de la finalidad del estudio, como alineamiento con otros genomas, estudiar relaciones filogenéticas y realizar anotaciones sobre los distintos genes presentes (*genome mining*) [16], [17].

Fundamento bioquímico de las técnicas de secuenciación

Segunda generación

La secuenciación de segunda generación consiste en plataformas que producen gran cantidad de lecturas cortas (25-400 bp) de secuencias de ADN [18]. En esta generación destaca la empresa Illumina Inc., actualmente dominante en el mercado. Asimismo, otras empresas como Roche 454, AB SOLiD y Ion Torrent fueron desarrolladas en torno a este modelo; sin embargo, fueron desplazadas y/o discontinuadas por la innovación de la tecnología de Illumina.

El concepto detrás de la tecnología NGS es similar a la técnicas de secuenciación de Sanger, previamente descrita [19]. La tecnología de Illumina utiliza el método de secuenciación por síntesis (*sequencing by synthesis*, SBS), permitiendo la lectura paralela de millones de fragmentos por medio de la detección de las bases individuales a medida que se incorporan a las cadenas de ADN en crecimiento [19], [20]. La ADN polimerasa cataliza la incorporación de desoxirribonucleótidos trifosfato (dNTP) marcados con fluorescencia a una hebra molde de ADN durante ciclos secuenciales de síntesis. Durante cada ciclo los nucleótidos se identifican mediante excitación del fluoróforo [19], creando una imagen de un terminador reversible marcado fluorescentemente a medida que se añade cada dNTP, y luego se separa para el ingreso de la siguiente base. Al finalizar, se obtiene una secuenciación base por base con datos de alta precisión y calidad, para una gran variedad de usos, como el ensamblaje *de novo*, la resecuenciación, la identificación de mutaciones de interés clínico y la metagenómica [19], [21].

Tercera generación

Las técnicas de secuenciación masiva de ácidos nucleicos de segunda generación presentan debilidades, principalmente en cuanto a la capacidad de generar lecturas extensas (>1 kb). Para satisfacer estas necesidades se desarrollaron las tecnologías de tercera generación (*third-generation sequencing*, TGS), las cuales permiten extensiones de hasta 2.3 Mb y no requieren de una amplificación preliminar, disminuyendo la incidencia de pérdidas de marcas epigenéticas [22].

Existen dos proveedores altamente utilizados para la secuenciación de lecturas largas: Pacific Biosciences y Oxford Nanopore Technologies Inc. PacBio tiene la capacidad de generar lecturas HiFi (*High Fidelity*) con una resolución alta por base. Por su parte, ONT puede generar lecturas con una extensión de hasta 2 Mb [23]. Además, existen otras plataformas emergentes de TGS, como Molecu y 10X Genomics, basadas en el ensamblaje de lecturas cortas para generar lecturas largas sintéticas [24]. En este artículo se exploran las tecnologías de PacBio y ONT, dado que son las más establecidas y comercializadas.

La tecnología de Oxford Nanopore Technologies fue lanzada en el 2014 y utiliza la secuenciación por nanoporos, los cuales emplean el perfil eléctrico de cada nucleótido de ADN y ARN para su identificación [25]. Estos canales permiten el paso de una molécula a la vez, detectando cambios en la corriente eléctrica característicos de cada nucleótido [22]. El fundamento de la secuenciación de ONT permite la lectura directa de secuencias de ARN, siendo esta la única tecnología con dicha capacidad [26], [27].

Por otro lado, la empresa Pacific Biosciences es líder de la tercera generación, con la tecnología de secuenciación en tiempo real de una sola molécula (*Single-Molecule, Real-Time, SMRT*) lanzada en el 2011 [28]. Esta produce lecturas largas de 3000-15000 bp, se utiliza ampliamente para la elaboración de perfiles filogenéticos de microbiomas por medio de una clasificación taxonómica a nivel de género; así bien, también es utilizada en estudios genómicos, transcriptómicos, epigenómicos, metagenómicos y de ensamblaje *de novo* [24], [29].

La estrategia de secuenciación de PacBio consiste en una modificación de la SBS de Illumina, en la cual se logra capturar una sola molécula de ADN que ingresa a celdas de flujo con tecnología de guía de onda de modo cero (*zero-mode waveguide, ZMW*) [22]. La ZMW es un dispositivo focalizador de la luz hacia un punto específico, lo que permite el registro preciso de la señal lumínica emitida por un fluoróforo unido a un nucleótido específico [22], [30].

Comparación entre tecnologías de segunda y tercera generación

Características de la secuenciación

Las tecnologías de secuenciación de Illumina se caracterizan por la lectura de fragmentos cortos de ADN [31]. Este tipo de secuenciación se recomienda para análisis de variantes clínicas, ya que es altamente preciso y eficiente, permitiendo la identificación de variaciones genéticas de menor frecuencia [32], [33]. Su rendimiento se considera más alto que las tecnologías de tercera generación, y la preparación de la muestra, más compleja al requerir una amplificación por PCR [27], [34], [35]. A pesar de una baja tasa de error (0.01%), cuenta con algunos sesgos y limitaciones. En primer lugar, la lectura de secuencias cortas se ve limitada ante las repeticiones en tándem del ADN. Esto puede causar errores en la lectura en forma de *gaps* y complicaciones en el ensamblaje [36]. Se han reportado errores en sustituciones; es decir, el reemplazo de una base por otra no correspondiente, y errores menos frecuentes (p. ej. inserciones, deleciones, errores específicos) a ciertos *motifs* e interferencias entre muestras multiplexadas [21], [37]. Algunos de estos se adjudican a sesgos por el contexto de la secuencia, así como procesos químicos relacionados a la tecnología de secuenciación y la preparación de las librerías genómicas [31], [38].

Seguidamente, Oxford Nanopore Technologies Inc. ha desarrollado tecnologías de secuenciación para longitudes de fragmentos especialmente largos, siendo esta característica una de sus principales ventajas. La secuenciación de fragmentos largos brinda ventajas al momento de realizar el ensamblaje genómico, como una mayor repetitividad de fragmentos, cobertura y probabilidad para el cierre del genoma, en comparación con ensamblajes de secuencia cortas [39], [40]. Asimismo, ONT es la única tecnología en el mercado que permite la secuenciación de ARN de forma directa. Dicho estilo de secuenciación favorece el estudio de organismos cuyo material genético se encuentra basado en ARN, como algunos virus, y colabora con el análisis de estructuras genéticas relacionadas, como los ARN largos no codificantes y retrotransposones [41], [42]. Además, es destacable la mejora en el análisis de organismos cuyo genoma completo no se encuentra reportado o ensamblado en una sola secuencia (*contig*) [43]. Por ejemplo, una nueva actualización del genoma humano con regiones que no habían sido previamente secuenciadas fue reportado recientemente con ayuda de las tecnologías de secuenciación de ONT [5], y el ensamblaje de cromosomas bacterianos y de microorganismos en un único *contig* ha sido favorecido de la misma forma [44]–[46].

Sin embargo, una de las principales desventajas de las tecnologías de secuenciación de fragmentos largos se relaciona a la calidad de las lecturas. La amplia longitud de las secuencias leídas aumenta la tasa de error, tendencia mantenida a lo largo de las secuenciaciones para ADN y ARN de forma directa e indirecta [32], [35], [47]. En las tecnologías de ONT, la tasa de error se ha presentado con una media de <0.1% [25].

Finalmente, la tecnología de secuenciación de PacBio permite la medición en tiempo real de la incorporación de nucleótidos de acuerdo con señales de luz emitidas por el sistema [28], [30]. Este es utilizado para la lectura de cadenas largas de ADN y ARN indirectamente, sin que se comprometa la precisión. Por lo cual, su secuenciación es libre de error sistemático al contar con más de un 99.999% de precisión por consenso [28]. Asimismo, la secuenciación cuenta con bajo sesgo por contexto de la muestra, un mapeo preciso de las lecturas y cobertura uniforme al no haber desviaciones por el contenido de bases GC. Una característica distintiva de este tipo de secuenciación es su análisis epigenómico sin la necesidad de amplificar por PCR; el sistema es capaz de detectar directamente modificaciones a las bases durante la secuenciación, especialmente la metilación 5mC [30]. Esto sirve para eliminar la necesidad de alguna modificación química para realizar esta clase de estudios, reduciendo costos, tiempo y aumentando la eficiencia experimental [30]. Adicionalmente, PacBio ha sido empleada para la secuenciación a partir de una célula (*single-cell sequencing*), técnica que favorece el estudio de haplotipos y mutaciones de ultra baja frecuencia posiblemente asociadas a patologías [48]–[50].

Dispositivos

Illumina cuenta con una línea de secuenciadores de sobremesa (*benchtop sequencers*) y otra de secuenciadores de producción a escala (*production-scale sequencers*) [51]. Los secuenciadores sobremesa (cuadro 1) poseen la capacidad de realizar secuenciaciones de genoma completos, secuenciación dirigida, ARN y análisis metagenómicos de 16S. Por su parte, la línea de secuenciadores de producción a escala (cuadro 2) poseen las mismas funciones que los secuenciadores *benchtop* con un mayor poder de procesamiento. Los precios de los distintos dispositivos son protegidos por la compañía. Sin embargo, las ventas de servicios para MiSeq se estiman en \$185.71 por muestra al secuenciar 24 muestras multiplexadas, tomando en cuenta los costos de preparación de las librerías genómicas [35]. Una característica distintiva de estos equipos es tener un rendimiento masivo con un costo de miles de dólares para una corrida sencilla, resultando en un costo por muestra bajo, pero costo por corrida alto [27].

Cuadro 1. Dispositivos de secuenciación de sobremesa (*benchtop*) de las tecnologías de segunda y tercera generación [51]–[54].

	Illumina				ONT	
	iSeq 100	MiniSeq	MiSeq	NextSeq 550	MinION	GridION
Portabilidad	No	No	No	No	Sí	No
Tiempo de corrida (h)	9.5-19	4-24	4-55	12-30	~72	~72
Longitud máxima (bp)	150	150	300	150	10000	10000
Lecturas totales (mill)	4	25	25	400	110	110*
Uso en DIV	No	No	Sí**	Sí**	No	No
Costo	No disp.	No disp.	\$128000	No disp.	\$1000-4900	\$50000

DIV = diagnóstico *in vitro*. No disp. = No disponible. *Por celda, GridION permite hasta 5 celdas por ejecución.

**Las versiones Dx de los dispositivos. Pacific Bioscience no posee ningún dispositivo de sobremesa comercializado.

Con respecto a los distintos dispositivos de ONT, en el mercado hay disponibles cuatro equipos principales, entre estos se pueden mencionar los secuenciadores de sobremesa: MinION y GridION (cuadro 1), y un equipo de producción a escala: PromethION (cuadro 2) [53], [54]. Dichos equipos poseen la capacidad de secuenciar genomas y transcriptomas completos de forma directa e indirecta y secuenciaciones dirigidas; así bien, el equipo a escala permite realizar análisis poblacionales y metagenómicos. El MinION y GridION son tecnologías que emplean celdas de flujo específicas con 512 nanoporos; mientras que, el PromethION utiliza celdas con 2675 nanoporos, brindándole 6 veces mayor capacidad de procesamiento simultáneo. Las celdas de 512 nanoporos poseen un valor de \$900, y las de 2675 nanoporos presentan un costo de \$2400 [54]. El cuarto equipo desarrollado corresponde a un adaptador para MinION y GridION llamado Flonge, el cual permite la realización de secuenciaciones pequeñas con celdas de flujo de un solo uso; dichas celdas poseen la capacidad de secuenciación de ~24 horas en condiciones óptimas. Este dispositivo presenta un valor de \$1460, donde se incluyen adicionalmente 12 celdas de flujo. Así bien, sus celdas pueden ser compradas de forma independiente en paquetes de nueve y cuentan con un precio de \$810 [53], [54].

Cuadro 2. Dispositivos de secuenciación de producción a escala (*production-scale*) de las tecnologías de segunda y tercera generación [51], [53]–[55].

	Illumina			ONT	PacBio
	NextSeq 1000 & 2000	NovaSeq X	NovaSeq 6000	PromethION 2, 24 y 48	Sequel II y IIe
Tiempo de corrida (h)	11-48	13-48	13-44	~72	30
Longitud máxima (bp)	150	150	250	10000	4000000
Lecturas totales (bill)	1.2	1.6-52	20	0.110*	~99
Output	360 Gb	165-16000 Gb	6 Tb – 20 B	7-14 Tb*	30 Gb
Costo	No disp.	No disp.	No disp.	\$225000	\$495000

No disp. = No disponible. *Por celda, existen tres versiones de PromethION (2, 24 y 48), que difieren en la cantidad de celdas por ejecución (dos, 24 o 48 celdas).

En relación con PacBio, esta empresa posee una única línea desarrollada de secuenciadores a escala llamada Sequel, cuyos los principales dispositivos utilizados son: Sequel II y IIe (cuadro 2) [55]. Estos permiten la secuenciación de todo tipo de genomas, transcriptomas y epigenomas. Un servicio de la secuenciación de 30 horas por medio de Sequel II presenta un valor mayor a los \$3000 por muestra; esto según las cotizaciones generadas por la Universidad de Washington (University of Washington) [56].

Disponibilidad de servicios

Illumina Inc. cuenta con oficinas comerciales en Estados Unidos, Australia, Alemania, China, Francia, Japón, América Latina, Corea, Holanda, Singapur y el Reino Unido; paralelamente, tiene dos centros de manufactura, investigación y desarrollo en California (Estados Unidos) y Woodlands (Singapur) [57]. Por su parte, Oxford Nanopore Technologies Inc. presenta sitios de contacto en Estados Unidos, Reino Unido, Singapur, China y Japón, así como una gran cantidad de distribuidoras a nivel mundial [58]. Sin embargo, solamente existe una distribuidora encargada de la cobertura de los países centroamericanos y ciertos países de América Latina (Interprise) [59]. Finalmente, PacBio posee diferentes sedes en Estados Unidos, Reino Unido, China, Singapur y Japón, con su principal ubicada en Menlo Park (California, Estados Unidos) [60]. De la misma forma posee múltiples distribuidores ubicados a lo largo del pacífico de Asia,

Europa, Medio Oriente y América. En este sentido, ninguna de las sedes actuales cubre a los países centroamericanos, y el único país latinoamericano con distribuidora para esta empresa es México [61].

Consideraciones futuras

La creación y actualización de programas bioinformáticos, añadiendo funciones prácticas para el estudio de las secuencias y evitando la polarización del tipo de datos (*reads* largos o cortos) para el análisis híbrido, representa otra área de desarrollo. Por ejemplo, Next Generation Sequencing Eclipse Plugin (NGSEP) agrega la función de “Estadísticas sobre poblaciones genotipadas”, útil en el análisis de la estructura poblacional, construcción de mapas genéticos, mapeo genético de rasgos complejos y predicción de fenotipos para la selección genómica, así complementando las posibilidades de análisis genómico [61]. De la misma forma, los ensambladores híbridos de Unicycler [15] y SPAdes [62] son tecnologías emergentes que permiten la utilización de datos de distintas generaciones de secuenciación, favoreciendo a los ensamblajes en un solo *contig* de mayor calidad y completitud [63].

Asimismo, es relevante la expansión del uso de estas tecnologías por medio del aumento del soporte técnicos y la disponibilidad de servicios, especialmente a países latinoamericanos. Esto considerando los beneficios asociados en espacios científicos, clínicos y demás áreas [64], [65]. Algunos obstáculos relacionados a la inequidad, el estado de desarrollo, la falta de cobertura de las empresas y la migración de profesionales, deben de ser abordados con la finalidad de permitir el fortalecimiento de dichas tecnologías [66]–[68].

Conclusiones

En conclusión, las tecnologías de secuenciación representan una herramienta importante para el desarrollo de la investigación, la industria y la clínica. Illumina, Oxford Nanopore Technologies y PacBio son las empresas de mayor auge a nivel mundial con tecnologías de secuenciación de segunda y tercera generación. Los fundamentos de estas secuenciaciones emplean la secuenciación por síntesis, nanoporos o una única molécula en tiempo real. Así bien, Illumina se concentra en lecturas de fragmentos cortos, mientras que ONT y PacBio, en lecturas de fragmentos largos. Cada una posee ciertas desventajas relacionadas, como baja calidad en las lecturas largas o complicaciones en el ensamblaje de lecturas cortas. Asimismo, estas empresas difieren en otros aspectos relacionados a los dispositivos disponibles, las posibles aplicaciones y su accesibilidad (cuadro 3).

Cuadro 3. Características de funcionamiento, dispositivos y accesibilidad de las tecnologías de secuenciación de Illumina Inc., Oxford Nanopore Technologies Inc. y PacBio.

	Illumina	ONT	PacBio
Tipo de secuenciación	Por síntesis (SBS)	Por nanoporos	Tiempo real de una única molécula (SMRT)
Longitud de secuencias	Cortas (<400 bp)	Largas (>500)	Ambas
Tasa de error (precisión)	0.01%	<0.1%	<0.001%
Secuenciación de genoma completo	Sí	Sí	Sí
Secuenciación dirigida	Sí	Sí	Sí
Secuenciación de ARN	Indirecta	Directa e indirecta	Indirecta
Análisis metagenómico	Sí	Sí	Sí
Análisis epigenómico	No	No	Sí
Dispositivos sobremesa	iSeq 100, MiniSeq, MiSeq, NextSeq 550	MinION, GridION, Flonge (adaptador)	-
Dispositivos de producción a escala	NextSeq 1000 & 2000, NovaSeq X, Nova Seq 6000	PromethION 2, 24 y 48	Sequel II y Ile
Distribuidora en Latinoamérica (¿Cubre países centroamericanos?)	BioSystems S.A. - Argentina, Global Bio Supplies – Venezuela, Capris Medica – Costa Rica, entre otros (Sí).	Interprise (Sí)	Distribuidora Química y Hospitalaria GAP – México (No)

Referencias

- [1] F. Sanger, S. Nicklen, and A. R. Coulson, "DNA sequencing with chain-terminating inhibitors," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 74, no. 12, pp. 5463–5467, Dec. 1977, doi: 10.1073/PNAS.74.12.5463.
- [2] C. R. Gade, M. Dixit, and N. K. Sharma, "Dideoxy nucleoside triphosphate (ddNTP) analogues: Synthesis and polymerase substrate activities of pyrrolidiny nucleoside triphosphates (prNTPs)," *Bioorg Med Chem*, vol. 24, no. 18, pp. 4016–4022, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.BMC.2016.06.043.
- [3] J. Craig Venter *et al.*, "The sequence of the human genome," *Science (1979)*, vol. 291, no. 5507, pp. 1304–1351, Feb. 2001, doi: 10.1126/SCIENCE.1058040/SUPPL_FILE/1058040S3-7_LARGE.JPEG.
- [4] R. A. Gibbs, "The Human Genome Project changed everything," *Nat Rev Genet*, vol. 21, no. 10, pp. 575–576, Aug. 2020, doi: 10.1038/S41576-020-0275-3.
- [5] S. Nurk *et al.*, "The complete sequence of a human genome," *Science (1979)*, vol. 376, no. 6588, pp. 44–53, Apr. 2022, doi: 10.1126/SCIENCE.ABJ6987.
- [6] B. Amer and E. E. K. Baidoo, "Omics-Driven Biotechnology for Industrial Applications," *Front Bioeng Biotechnol*, vol. 9, p. 30, Feb. 2021, doi: 10.3389/FBIOE.2021.613307/BIBTEX.
- [7] R. Bhattacharjya, A. Tiwari, T. K. Marella, H. Bansal, and S. Srivastava, "New paradigm in diatom omics and genetic manipulation," *Bioresour Technol*, vol. 325, p. 124708, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2021.124708.
- [8] M. A. Wörheide, J. Krumsiek, G. Kastenmüller, and M. Arnold, "Multi-omics integration in biomedical research – A metabolomics-centric review," *Anal Chim Acta*, vol. 1141, pp. 144–162, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ACA.2020.10.038.
- [9] J. M. Heather and B. Chain, "The sequence of sequencers: The history of sequencing DNA," *Genomics*, vol. 107, no. 1, pp. 1–8, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.YGENO.2015.11.003.
- [10] W. Huang, L. Li, J. R. Myers, and G. T. Marth, "ART: a next-generation sequencing read simulator," *Bioinformatics*, vol. 28, no. 4, pp. 593–594, 2012.
- [11] S. Goodwin, J. D. McPherson, and R. McCombie, "Coming of age: ten years of next-generation sequencing technologies," *Nat Rev Genet*, vol. 17, no. 6, pp. 333–351, 2016, doi: 10.1038/nrg.2016.49.
- [12] W. de Coster, S. D’hert, D. T. Schultz, M. Cruts, and C. van Broeckhoven, "NanoPack: visualizing and processing long-read sequencing data," *Bioinformatics*, vol. 34, no. 15, pp. 2666–2669, 2018.

- [13] J. Brown, M. Pirrung, and L. A. McCue, "FQC Dashboard: integrates FastQC results into a web-based, interactive, and extensible FASTQ quality control tool," *Bioinformatics*, vol. 33, no. 19, pp. 3137–3139, 2017.
- [14] S. F. Yang, C. W. Lu, C. te Yao, and C. M. Hung, "To Trim or Not to Trim: Effects of Read Trimming on the De Novo Genome Assembly of a Widespread East Asian Passerine, the Rufous-Capped Babbler (*Cyanoderma ruficeps* Blyth)," *Genes (Basel)*, vol. 10, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/GENES10100737.
- [15] R. R. Wick, L. M. Judd, C. L. Gorrie, and K. E. Holt, "Unicycler: Resolving bacterial genome assemblies from short and long sequencing reads," *PLoS Comput Biol*, vol. 13, no. 6, Jun. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PCBI.1005595.
- [16] M. Alser *et al.*, "Accelerating genome analysis: A primer on an ongoing journey," *IEEE Micro*, vol. 40, no. 5, 2020.
- [17] M. T. Swain, I. J. Tsai, S. A. Assefa, C. Newbold, M. Berriman, and T. D. Otto, "A Post-assembly genome-improvement toolkit (PAGIT) to obtain annotated genomes from contigs," *Nat Protoc*, vol. 7, no. 7, p. 1260, Jul. 2012, doi: 10.1038/NPROT.2012.068.
- [18] M. Imelfort and D. Edwards, "De novo sequencing of plant genomes using second-generation technologies," *Brief Bioinform*, vol. 10, no. 6, pp. 609–618, Nov. 2009, doi: 10.1093/BIB/BBP039.
- [19] Illumina, "An introduction to Next-Generation Sequencing Technology." www.illumina.com/technology/next-generation-sequencing.html (accessed Oct. 03, 2022).
- [20] E. R. Mardis, "Next-Generation Sequencing Platforms," *Annual Review of Analytical Chemistry*, vol. 6, pp. 287–303, Jun. 2013, doi: 10.1146/ANNUREV-ANCHEM-062012-092628.
- [21] M. Molnar and L. Ilie, "Correcting Illumina data," *Brief Bioinform*, vol. 16, no. 4, pp. 588–599, Jul. 2015, doi: 10.1093/bib/bbu029.
- [22] J. M. Valderrama Martín, F. Ortigosa, and R. Cañas, "Métodos de secuenciación: tercera generación," *Encuentros en la Biología*, vol. 13, no. 175, pp. 15–21, 2020.
- [23] D. Lang *et al.*, "Comparison of the two up-to-date sequencing technologies for genome assembly: HiFi reads of Pacific Biosciences Sequel II system and ultralong reads of Oxford Nanopore," *Gigascience*, vol. 9, no. 12, pp. 1–7, Nov. 2020, doi: 10.1093/GIGASCIENCE/GIAA123.
- [24] D. Buck *et al.*, "Comprehensive comparison of Pacific Biosciences and Oxford Nanopore Technologies and their applications to transcriptome analysis," *F1000Res*, vol. 6, 2017, doi: 10.12688/F1000RESEARCH.10571.2.
- [25] C. Delahaye and J. Nicolas, "Sequencing DNA with nanopores: Troubles and biases," *PLoS One*, vol. 16, no. 10, p. e0257521, Oct. 2021, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0257521.
- [26] B. Lin, J. Hui, and H. Mao, "Nanopore Technology and Its Applications in Gene Sequencing," *Biosensors 2021, Vol. 11, Page 214*, vol. 11, no. 7, p. 214, Jun. 2021, doi: 10.3390/BIOS11070214.
- [27] E. E. Schadt, S. Turner, and A. Kasarskis, "A window into third-generation sequencing," *Hum Mol Genet*, vol. 19, no. R2, pp. R227–R240, Oct. 2010, doi: 10.1093/hmg/ddq416.
- [28] J. Eid *et al.*, "Real-Time DNA Sequencing from Single Polymerase Molecules," *Science (1979)*, vol. 323, no. 5910, pp. 133–138, Jan. 2009, doi: 10.1126/science.1162986.
- [29] E. B. Fichot and R. S. Norman, "Microbial phylogenetic profiling with the Pacific Biosciences sequencing platform," *Microbiome*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, Mar. 2013, doi: 10.1186/2049-2618-1-10/FIGURES/4.
- [30] PacBio, "How HiFi sequencing works - PacBio." <https://www.pacb.com/technology/hifi-sequencing/how-it-works/> (accessed Oct. 02, 2022).
- [31] M. Schirmer, R. D'Amore, U. Z. Ijaz, N. Hall, and C. Quince, "Illumina error profiles: resolving fine-scale variation in metagenomic sequencing data," *BMC Bioinformatics*, vol. 17, no. 1, p. 125, Dec. 2016, doi: 10.1186/s12859-016-0976-y.
- [32] D. Tshiabuila *et al.*, "Comparison of SARS-CoV-2 sequencing using the ONT GridION and the Illumina MiSeq," *BMC Genomics*, vol. 23, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2022, doi: 10.1186/S12864-022-08541-5/FIGURES/8.
- [33] K. Thys, P. Verhasselt, J. Reumers, B. M. P. Verbist, B. Maes, and J. Aerssens, "Performance assessment of the Illumina massively parallel sequencing platform for deep sequencing analysis of viral minority variants," *J Virol Methods*, vol. 221, pp. 29–38, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2015.04.022>.
- [34] S. S. T. Mak *et al.*, "Comparative performance of the BGISEQ-500 vs Illumina HiSeq2500 sequencing platforms for palaeogenomic sequencing," *Gigascience*, vol. 6, no. 8, Jun. 2017, doi: 10.1093/gigascience/gix049.
- [35] A. Pecman *et al.*, "Systematic Comparison of Nanopore and Illumina Sequencing for the Detection of Plant Viruses and Viroids Using Total RNA Sequencing Approach," *Front Microbiol*, vol. 13, 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.883921.

- [36] A. P. Heikema *et al.*, “Comparison of Illumina versus Nanopore 16S rRNA Gene Sequencing of the Human Nasal Microbiota,” *Genes (Basel)*, vol. 11, no. 9, 2020, doi: 10.3390/genes11091105.
- [37] E. S. Wright and K. H. Vetsigian, “Quality filtering of Illumina index reads mitigates sample cross-talk,” *BMC Genomics*, vol. 17, no. 1, p. 876, 2016, doi: 10.1186/s12864-016-3217-x.
- [38] A. Cacho, E. Smirnova, S. Huzurbazar, and X. Cui, “A Comparison of Base-calling Algorithms for Illumina Sequencing Technology,” *Brief Bioinform*, vol. 17, no. 5, pp. 786–795, Sep. 2016, doi: 10.1093/bib/bbv088.
- [39] S. Goldstein, L. Beka, J. Graf, and J. L. Klassen, “Evaluation of strategies for the assembly of diverse bacterial genomes using MinION long-read sequencing,” *BMC Genomics*, vol. 20, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2019, doi: 10.1186/S12864-018-5381-7/FIGURES/7.
- [40] M. A. Madoui *et al.*, “Genome assembly using Nanopore-guided long and error-free DNA reads,” *BMC Genomics*, vol. 16, no. 1, pp. 1–11, Dec. 2015, doi: 10.1186/S12864-015-1519-Z/TABLES/3.
- [41] I. Kirov *et al.*, “Nanopore RNA Sequencing Revealed Long Non-Coding and LTR Retrotransposon-Related RNAs Expressed at Early Stages of Triticale SEED Development,” *Plants*, vol. 9, no. 12, p. 1794, Dec. 2020, doi: 10.3390/PLANTS9121794.
- [42] T. Wongsurawat *et al.*, “Rapid sequencing of multiple RNA viruses in their native form,” *Front Microbiol*, vol. 10, no. FEB, p. 260, 2019, doi: 10.3389/FMICB.2019.00260/BIBTEX.
- [43] A. Bayega *et al.*, “Nanopore long-read RNA-seq and absolute quantification delineate transcription dynamics in early embryo development of an insect pest,” *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/S41598-021-86753-7.
- [44] G. Wang *et al.*, “A strategy for complete telomere-to-telomere assembly of ciliate macronuclear genome using ultra-high coverage Nanopore data,” *Comput Struct Biotechnol J*, vol. 19, pp. 1928–1932, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CSBJ.2021.04.007.
- [45] Y. Wang, X. Cai, and Y. Mao, “The first complete genome sequence of species *Shewanella decolorationis*, from a bioremediation competent strain Ni1-3,” *G3 Genes|Genomes|Genetics*, vol. 11, no. 10, Sep. 2021, doi: 10.1093/G3JOURNAL/JKAB261.
- [46] E. L. Moss, D. G. Maghini, and A. S. Bhatt, “Complete, closed bacterial genomes from microbiomes using nanopore sequencing,” *Nat Biotechnol*, vol. 38, no. 6, pp. 701–707, Jun. 2020, doi: 10.1038/S41587-020-0422-6.
- [47] A. Bruno, J. M. Aury, and S. Engelen, “BoardION: real-time monitoring of Oxford Nanopore sequencing instruments,” *BMC Bioinformatics*, vol. 22, no. 1, pp. 1–8, Dec. 2021, doi: 10.1186/S12859-021-04161-0/FIGURES/5.
- [48] J. R. Revollo, J. A. Miranda, and V. N. Dobrovolsky, “PacBio sequencing detects genome-wide ultra-low-frequency substitution mutations resulting from exposure to chemical mutagens,” *Environ Mol Mutagen*, vol. 62, no. 8, pp. 438–445, Oct. 2021, doi: 10.1002/EM.22462.
- [49] Y. Zeng, X. Wang, and J. Zhang, “Single-cell biomedicine: roles of single-cell nuclear elements,” *Cell Biol Toxicol*, vol. 36, no. 1, Feb. 2020, doi: 10.1007/S10565-020-09515-7.
- [50] S. B. Kingan *et al.*, “A High-Quality De novo Genome Assembly from a Single Mosquito Using PacBio Sequencing,” *Genes (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 62, Jan. 2019, doi: 10.3390/GENES10010062.
- [51] Illumina, “Sequencing Platforms | Compare NGS platform applications & specifications.” <https://www.illumina.com/systems/sequencing-platforms.html> (accessed Oct. 03, 2022).
- [52] M. A. Quail *et al.*, “A tale of three next generation sequencing platforms: comparison of Ion Torrent, Pacific Biosciences and Illumina MiSeq sequencers,” *BMC Genomics*, vol. 13, no. 1, p. 341, 2012, doi: 10.1186/1471-2164-13-341.
- [53] Oxford Nanopore Technologies, “Products | Oxford Nanopore Technologies.” <https://nanoporetech.com/products> (accessed Oct. 01, 2022).
- [54] Oxford Nanopore Technologies, “Store | Oxford Nanopore Technologies.” <https://store.nanoporetech.com/devices.html> (accessed Oct. 01, 2022).
- [55] PacBio, “Sequel systems - PacBio.” <https://www.pacb.com/technology/hifi-sequencing/sequel-system/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [56] University of Washington, “University of Washington PacBio Sequencing Services.” <https://pacbio.gs.washington.edu/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [57] Illumina, “Office Locations | Contact information.” <https://www.illumina.com/company/contact-us/locations.html> (accessed Oct. 03, 2022).

- [58] Oxford Nanopore Technologies, "Contact us | Oxford Nanopore Technologies." <https://nanoporetech.com/contact> (accessed Oct. 01, 2022).
- [59] Oxford Nanopore Technologies, "Nanopore Distributors directory." <https://nanoporetech.com/services/distributors> (accessed Oct. 01, 2022).
- [60] PacBio, "Contact us - PacBio." <https://www.pacb.com/contact-us/> (accessed Oct. 01, 2022).
- [61] C. Perea *et al.*, "Bioinformatic analysis of genotype by sequencing (GBS) data with NGSEP," *BMC Genomics*, vol. 17, Aug. 2016, doi: 10.1186/S12864-016-2827-7.
- [62] A. Prjibelski, D. Antipov, D. Meleshko, A. Lapidus, and A. Korobeynikov, "Using SPAdes De Novo Assembler," *Curr Protoc Bioinformatics*, vol. 70, no. 1, p. e102, Jun. 2020, doi: 10.1002/CPBI.102.
- [63] A. Khezri, E. Avershina, and R. Ahmad, "Hybrid Assembly Provides Improved Resolution of Plasmids, Antimicrobial Resistance Genes, and Virulence Factors in *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* Clinical Isolates," *Microorganisms*, vol. 9, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/MICROORGANISMS9122560.
- [64] M. Santos *et al.*, "Increasing access to next-generation sequencing in oncology for Brazil," *Lancet Oncology*, vol. 20, pp. 20–23, 2019, doi: 10.1016/S1470-2045(18)30822-2.
- [65] W. A. Mantilla, M. C. Sanabria-Salas, A. M. Baldion, L. F. Sua, D. M. Gonzalez, and M. Lema, "NGS in Lung, Breast, and Unknown Primary Cancer in Colombia: A Multidisciplinary Consensus on Challenges and Opportunities," *JCO Glob Oncol*, no. 7, pp. 1012–1023, Dec. 2021, doi: 10.1200/go.21.00046.
- [66] M. Helmy, M. Awad, and K. A. Mosa, "Limited resources of genome sequencing in developing countries: Challenges and solutions," *Appl Transl Genom*, vol. 9, pp. 15–19, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.ATG.2016.03.003.
- [67] S. A. Vishnopolaska *et al.*, "Genetics and genomic medicine in Argentina," *Mol Genet Genomic Med*, vol. 6, no. 4, pp. 481–491, Jul. 2018, doi: 10.1002/MGG3.455.
- [68] M. Chand and R. L. Tung, "Skilled immigration to fill talent gaps: A comparison of the immigration policies of the United States, Canada, and Australia," *Journal of International Business Policy*, vol. 2, no. 4, pp. 333–355, Dec. 2019, doi: 10.1057/S42214-019-00039-4/TABLES/3.

El desarrollo de plástico biodegradable a partir del cáñamo por estímulo microbiano

The development of biodegradable plastic from hemp by microbial stimulus

Johanna Marcela Moscoso-Gama¹, Maria Camila Sanabria-Cuervo², Ana Maria Sanchez-Rubiano³

Fecha de recepción: 6 de mayo, 2023

Fecha de aprobación: 11 de setiembre, 2023

Moscoso-Gama, M; Sanabria-Cuervo, M.C; Sanchez-Rubiano, A.M. El desarrollo de plástico biodegradable a partir del cáñamo por estímulo microbiano. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 82-94.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6712>

1 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca; Colombia. Correo electrónico: jperpe@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-9963-5978>

2 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Colombia. Correo electrónico: mcsanabria@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0003-2850-0296>

3 Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Colombia. Correo electrónico: amsanchezrubiano@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0000-4861-312X>

Palabras clave

Cáñamo, *Ralstonia eutropha* - *Cupriavidus necator*, Bioplásticos, Polihidroxicanoatos (PHA), Polihidroxibutirato (PHB)

Resumen

Actualmente varias industrias de diversa índole han apostado por el uso de Cannabis sativa con diferentes fines, en esta ocasión se resalta la capacidad que tiene la fibra del tallo de cáñamo en conjunto con la bacteria *Ralstonia eutropha* para la generación de plásticos biodegradables, aprovechando su potencial para la generación de PHB (Polihidroxibutirato). En este artículo de revisión se sustenta el análisis de fuentes como artículos científicos y trabajos de investigación relacionados con la manipulación artesanal e industrial de las fibras de cáñamo, así como también investigaciones previas con respecto a la producción de PHA por parte de la bacteria *Ralstonia eutropha*. La perspectiva es desarrollar una metodología con recursos de fácil acceso en Colombia. Los resultados arrojan que las investigaciones realizadas recientemente y la materia prima son un buen factor en cuanto economía, manejo y progreso; adicionalmente diferentes estudios evidencian que la yuca se ha reconocido como una gran fuente de carbono que permite aumentar el potencial de producción de PHB por parte de la bacteria. Se concluye que su compostaje no requiera de terceros, solamente del ambiente gracias al poder que posee la *Ralstonia eutropha* de producir PHB, y que bajo condiciones de estrés fisiológico es capaz de degradarse completamente permitiendo disminuir el impacto de la descomposición del material en el medio ambiente, sin contaminaciones o microplásticos residuales.

Keywords

Hemp, *Ralstonia eutropha*, Bioplastics, Polihidroxicanoates (PHA), Polihidroxybutirate (PHB).

Abstract

Currently, several industries have opted for the use of Cannabis sativa for different purposes, this time the capacity of the hemp stem fiber in conjunction with the *Ralstonia eutropha* bacterium for innovation of biodegradable plastics is highlighted, taking advantage of its potential for the generation of PHB (Polyhydroxybutyrate). This review article supports the analysis of sources such as scientific articles and research papers related to the artisanal and industrial manipulation of hemp fibers, as well as previous research regarding the production of PHA by the bacteria. The perspective is to develop a methodology with easily accessible resources in Colombia. The results show that the investigations carried out recently and the raw material is a good factor in economy, management, and progress; Additionally, different studies show that cassava is recognized as a great source of carbon that increases the potential for PHB production by the bacteria. It is concluded that its composting does not require third parties. Still, only the environment because of the power that *Ralstonia eutropha* has to produce PHB and that under conditions of physiological stress, it is capable of degrading, allowing to reduce the impact of the degradation of the material in the environment without contamination or residual microplastics.

Introducción

Estudio realizado en julio del 2020 por Ellen MacArthur y su fundación dio a conocer la verdadera problemática que existe en el mundo a causa de los plásticos, dispuso a conocimiento varios resultados clave que es de primordial interés en esta revisión, primero que en realidad por

más esfuerzos que se tengan para detener esta contaminación, el volumen abismal de plásticos complica este proyecto; segundo el cual refiere a que no solo se debe reducir el uso de plásticos, sino ELIMINAR cualquier uso de plástico que no se requiera; la tercera cuya percepción dará hincapié para iniciar este debate habla de la realidad de las soluciones que a través de los años se han ofrecido y que han sido hasta ahora insuficientes, por lo tanto se deben innovar y accionar de manera inmediata en nuevas soluciones que realmente tomen el problema desde la raíz con ambición y eficiencia.[1] En Colombia, se cuenta con un gasto de aproximadamente de 700.500 toneladas de envases y empaques plásticos, pero solo el 3% de este gasto es reciclado, denotando como un país que contribuye altamente en la contaminación del mar Caribe con desechos plásticos. Para acelerar la transición segura de los plásticos se requieren compromisos ambiciosos e implementados; en compañía de la Fundación MacArthur Colombia se suma a una de las muchas naciones para crear un Pacto por los Plásticos´ cuyos objetivos van desde colaborar para reducir la basura en tierra, agua dulce y medio marino; investigar las posibles oportunidades de los residuos plásticos en una segunda función alterna; apoyo al reciclaje de circuito cerrado hasta ejecutar modelos de reutilización; contribuir al cumplimiento de la ley 2232 de 2022 de los plásticos de un solo uso. Sin embargo, depende de la implementación global inmediata, ambiciosa y concertada de soluciones.[2] Por esta razón y muchas más, no es posible ignorar el problema que Colombia enfrenta con los plásticos, por otra parte y sin dejar una problemática de lado pero tomando en cuenta otra, es de conocimiento que Colombia no es la cuna del cáñamo por cuestiones socioculturales, pero ¿si así fuera? Ya se están desarrollando permisos e incluso leyes, que permite al campesino y/o emprendedores cultivar y manipular el cáñamo para usos innovadores, sumado a que es un país con todos los pisos térmicos, realmente la cosecha de cáñamo sería propia y sencilla, es una planta que no requiere tanto cuidado como otras y por ende se hace económico gracias a que se auto deshierba, son pocas o ninguna fitopatología, no tiene plagas, ni parásitos que la puedan infectar. Y en cuanto a su descomposición, dura 6 meses aproximadamente desde el momento que se inicie su compostaje para su total descomposición.[3]

Cáñamo (*Cannabis sativa*)

El cáñamo más conocido como *Cannabis sativa* es una especie herbácea que se origina en el Himalaya, Asia . Los humanos han cultivado esta planta desde años prehistóricos como principal fuente de fibra textil, extraer aceites de sus semillas o a partir de su fruto hacer todo tipo de infusiones medicinales. Su fibra tiene usos variados que van desde la fabricación de hilos o papel hasta alimento para mascotas y ganado. Las variedades de este *Cannabis* tienen también propiedades psicoactivas y son reguladas e incluso prohibidas en distintos países, pero como tal el cáñamo industrial tiene un porcentaje de 0,3% de THC, lo que no lo convierte en un riesgo. En su taxonomía existen 3 subespecies: *Sativa*, *Índica* y *Ruderalis*. Cada una con sus características particulares. [4]

Los cultivos en condiciones ideales, pueden crecer hasta 11 cm por día y crecimiento de 2 cm por día son comunes en su etapa rápida de crecimiento. La capa externa del tallo constituye, en promedio, el 30-35% del peso seco del tallo, con una porción de corteza de 12-48 %, así que el porcentaje de fibra va a ser aproximadamente 30%. El núcleo leñoso o xilema también conocido, es la parte fundamental para nuestro trabajo ya que de ahí sacaremos la paja de cáñamo, y este constituye un peso de 65-70% del peso total del tallo. Los atados de fibra, el cámbium y el xilema se van a ver aglutinados por resinas y pectinas de la planta. Así que el proceso para aflojar las fibras de la corteza y la madera se conoce como enriado. En cuanto a los requerimientos del cultivo, las variedades comerciales de cáñamo requieren un periodo libre de heladas de cinco meses o más para producir semillas y de aproximadamente cuatro meses para la producción de fibra, la temperatura ideal es de 1°C-45°C para la germinación. Como se

habla de una planta herbácea que requiere de suficiente luz solar durante la primera y segunda fase de crecimiento, se menciona que, para entrar a la etapa de floración, un cultivar de ciclo largo florece más tarde que uno de ciclo corto, y por lo mismo alcanza a producir más fibras antes de entrar a la fase reproductiva.[4]

Ralstonia eutropha - Cupriavidus necator

Este microorganismo se puede encontrar en el suelo y el agua. Este tiene un gran potencial como uso para la biorremediación, puesto que es capaz de degradar una gran cantidad de compuestos aromáticos y contaminantes. Originalmente fue aislada de lodos y recibía el nombre de *Alcaligenes eutrophus*. Con la ventaja de emplear fuentes de carbono y energía renovables como la fructosa y la glucosa, provenientes de subproductos agroindustriales, es una de las bacterias más utilizadas en la producción de PHA, debido a que es capaz de almacenar aproximadamente hasta un 96% de este material en peso seco.[5]

Es una bacteria Gram negativa en forma de bastones no formadora de esporas, muchas bacterias Gram negativas son conocidas por su capacidad de ser patógenas, pero esta bacteria no. Tiene motilidad y son aerobios facultativos, requiere principalmente de un entorno no halófilo (no salado) y su temperatura óptima de crecimiento es 30°C. Y crece mejor en presencia de concentraciones de varios metales pesados como zinc, cadmio, cobalto, plomo, mercurio, níquel y cromo.[6]

Las cepas de esta especie son utilizadas para estudiar la producción de polihidroxialcanoatos en versión microbiana y el metabolismo quimiolitotrófico en heterótrofos aeróbicos; pueden usar hidrógeno, dióxido de carbono y compuestos orgánicos para su desarrollo y es un organismo muy funcional para la oxidación de hidrógeno porque puede nutrirse del hidrógeno como única fuente de energía.[7] Cuando el oxígeno no está presente, puede utilizar un metabolismo diferente para crecer; puede obtener energía mediante desnitrificación anaerobia. Su metabolismo prefiere el ácido propiónico para la síntesis de masa celular y el ácido butírico para la síntesis de polímeros de PHA.[8] A pesar de su gran versatilidad en cuanto a fuentes nutricionales, su tasa de crecimiento es realmente baja. Contando que la mayor acumulación de gránulos poliméricos en esta bacteria ocurre cuando se encuentra en la fase estacionaria de crecimiento en un medio simple a partir de fuentes de carbono económicas tales como glucosa, fructosa y residuos de la industria oleícola; La mayoría de los trabajos de investigación utilizan cepas mutantes de *R. eutropha* capaces de crecer sobre glucosa. Sin embargo, la cepa nativa crece en fructosa, por lo cual es necesario establecer las condiciones para la acumulación del polímero.[9]

Para la producción del polímero por *R. eutropha*, la estrategia de fermentación más empleada es el cultivo por lote alimentado en el cual las células crecen hasta una determinada concentración sin limitación de nutrientes, luego un nutriente esencial es limitado para permitir la síntesis de PHAs. Durante esta etapa, la concentración de biomasa permanece constante presentándose acumulación de polímero.[10]

Bioplásticos

Los bioplásticos son materiales obtenidos a partir de fuentes renovables y la obtención de estos se puede dar por polisacáridos como la celulosa. Se considera que es un material que se desarrolla a través de la descomposición aeróbica o anaeróbica a causa de los microorganismos (bacterias, algas y hongos) que son degradados por la acción enzimática en condiciones habituales del ambiente, son obtenidos a partir de materia orgánica en la gran mayoría de biomasa, un gran porcentaje de estos bioplásticos son compostables. Los

polímeros biodegradables pueden clasificarse dependiendo de su proceso de extracción o si son removidos directamente de la biomasa como celulosa y almidón o con proteínas como colágeno y queratina.[11]

Al pasar los años, el plástico ha sido un problema para el medio ambiente, su tiempo tan prolongado de degradación hace que sea casi imposible eliminar la cantidad de basura producida, la cual no es realmente comprendida en cuanto a su gravedad por la sociedad, es entendible porqué llegó a un punto de ser insustituible, pero las cifras hablan de que social, cultural y ambientalmente se requieran opciones que dejen de perjudicar, cada año se produce 370 MMt aproximado de plásticos y solo el 1% de esta cifra son bioplásticos. Se ofrecen alternativas con polímeros que son fácil de conseguir cómo en fuentes renovables, desechos orgánicos o microorganismos, son elementos que no requieren de procesos arduos, químicos, petróleo, gas, minerales o cualquier recurso que en su explotación genere contaminación, lo que también llevaría a que los bioplásticos podrían sustituir alrededor del 85% de los plásticos convencionales en un mediano y largo plazo.[11]

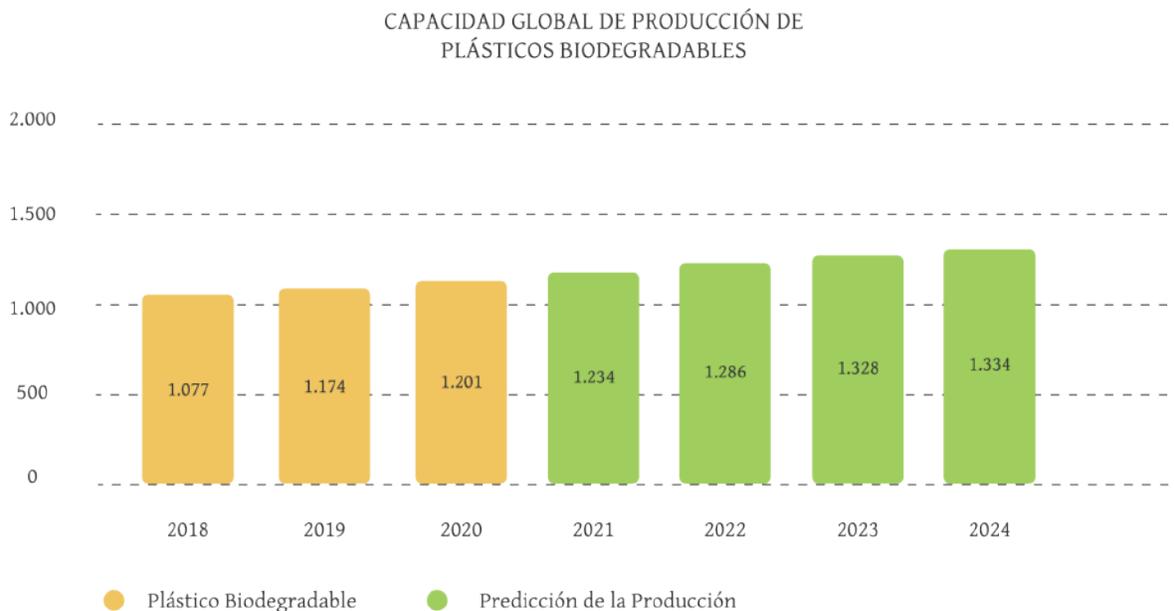


Figura 1. Capacidad global de producción de bioplásticos. Fuente: PMMI.Media group.

Como se evidencia en la figura 1, se espera que para el 2024 el mercado de bioplásticos crezca más de un 15%, debido al aumento de la industria por materiales que sean sostenibles. En Colombia, en 2018 el CONPES (Consejo Nacional de política Económica y Social) estableció la política de crecimiento verde, que tiene como meta la reducción de la huella de carbono y la transición de una economía lineal a una circular, para impulsar que los productos generen un menor impacto ambiental, conservando o incluso mejorando el desempeño y la calidad de los que son utilizados en la actualidad.[12]

El Cáñamo en la Industria

Actualmente el cáñamo es considerado uno de los materiales más innovadores para la producción de “composites” o polímeros derivados de materiales distintos que suelen caracterizarse por tener estructuras diferentes a nivel físico-químico. Al ser un recurso natural se establece como una alternativa renovable que reduce la generación de residuos y los problemas que surgen por procesamientos industriales contaminantes cuando se manejan materiales como el plástico convencional derivado del petróleo [13].

En principio es necesario discernir que la propia estructura de la planta es viable en temas de soporte, resistencia y tracción porque tiene varias fibras naturales de celulosa y hemicelulosa sujetas por lignina y pectina, el material en sí es fuerte, resistente y liviano, ya que está relacionado con el soporte que debe tener la planta para mantenerse estable y erguida desde el tallo a pesar de su longitud considerando también, que su composición vegetal facilita que pueda degradarse con facilidad sin mayor repercusión en el ambiente.

En el cuadro 1 se detallan algunas de las utilidades generales y específicas del cáñamo a partir de su composición estructural.

Cuadro 1. Utilidades del Cáñamo a partir de su composición estructural. Fuente: ICAN. Connect to Cannabis.[15].

UTILIDADES GENERALES DEL CÁÑAMO	
El mercado global de cáñamo está relacionado con diversas áreas de aplicación distribuido en casi nueve subáreas del mercado como lo son : Agricultura, textiles, reciclaje, industria automotriz, muebles , alimentos, medicamentos y bebidas, papel, materiales de construcción y productos de cuidado personal.	
UTILIDADES ESPECÍFICAS DEL CÁÑAMO	
Semillas	Tienen un alto valor proteico y de grasa, especialmente utilizado para: <ul style="list-style-type: none"> • Suplementos alimenticios • Aceites • Alimento para animales • Proteína en polvo
Tallo	Se utiliza para obtener dos tipos diferentes de fibras como: <p>Fibra Externa</p> <p>Es de contextura más rígida que el algodón, tiene aproximadamente un 70% de celulosa, que se utiliza para la producción de algunos materiales de construcción, cuerdas resistentes y textiles.</p> <p>Fibra Interna</p> <p>Se obtiene de la pulpa del tallo y se utiliza para la producción de aislantes composta orgánica y papel.</p>
Flor y hojas	Morfológicamente son muy reconocidas como símbolo de Cannabis en general son empleados en diferentes tipos de medicamentos con propiedades anticonvulsivas, ansiolíticas, antioxidantes , antiinflamatorias y en algunas ocasiones también tienen funciones en la regulación del sistema inmunitario.
Raíz	Al igual que diferentes partes de la planta es utilizado para diversos tipos de medicamentos pero también en la realización de composta orgánica gracias a la capacidad que tiene de fitorremediación del suelo a partir de metales pesados.

Metodología

Se realizó una comparación exhaustiva de diferentes investigaciones relacionadas con el manejo de las fibras de cáñamo para la producción de plásticos biodegradables; la recolección de datos se elaboró teniendo presente la cantidad de material aprovechable que resultaba en cada fase de procesamiento sugerido, así como los resultados obtenidos en el tratamiento convencional del cáñamo a comparación de métodos que se realizan de forma más artesanal o menos contaminantes para el ambiente en aras de acoplar los mejores resultados que ofrecen cada uno.

Proceso de Enriado

Es un proceso bioquímico que tiene como propósito la separación de fibras a través de microorganismos cuyas enzimas actúan principalmente sobre las pectinas que son las moléculas que mantienen unidas las células de la fibra. Este proceso puede realizarse a nivel del agua o del suelo, donde se ha entrado a considerar el impacto ambiental que tienen al presentar altos requerimientos en volumen de agua, así como también se ha visto que se encuentra relacionado con una alta Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) en las aguas utilizadas. Técnicamente la mayor diferencia entre un proceso de enriado con agua o por el suelo es la interacción microbiana para lograr la separación de las fibras, es decir, cuando se realiza en el agua, el método se puede aplicar optimizando un inóculo bacteriano objetivo, mientras que a nivel del suelo la interacción se realiza en el campo dejando los tallos en proceso de enriado a través de la interacción con hongos sin hacer uso de cantidades exorbitantes de agua sino más bien aprovechando la humedad del entorno y la lluvia [16] [17]

Métodos más modernos consisten en analizar cuidadosamente las condiciones que se manejan desde la cosecha del material vegetal hasta el momento en que se inicia la etapa de producción. Estudios realizados por Salvatore, et al. indica que la cosecha y el pretratamiento de las fibras se debe realizar con equipamiento moderno para evitar maltratar los tallos de donde se obtendrá la fibra a través de una segadora cosechadora para posteriormente complementar los procesos de enriado con un proceso de Bio Desgomado.[16]

Bio Desgomado

Este procedimiento se encuentra asociado con el método de purificación de aceites vegetales, ya que consiste en la eliminación de fosfatidos como lecitina y pectina cuando se aplica en fibras de origen natural.[17] Existen diferentes formas de realizar este proceso según el tipo de fibra que se requiera obtener; principalmente se lleva a cabo con Agua, Ácidos y a nivel Enzimático. Para la fibra de cáñamo específicamente, el proceso se hace a través de una solución donde se crean y se mantienen poblaciones microbianas que sean enraizantes, en lo que se denomina licor de enriado.[16] El propósito de este proceso es poder lograr separar los componentes diferentes de la celulosa que se encuentren en la fibra de cáñamo obtenida previamente a través del proceso de enriado como bien lo pueden ser la lignina y pectina por acción de enzimas que pueden obtenerse a través de bacterias principalmente.[18]

Uno de los factores más importantes para poder realizar un bio desgomado exitoso, es la cantidad de agua que se requiere, si bien los métodos de bio desgomado han surgido para poder disminuir la contaminación de los agentes químicos utilizados en el desgomado convencional junto con los residuos que deja el proceso inicial de enriado, aún no se ha logrado reducir considerablemente el gasto de agua para realizar el proceso.[18] En el trabajo realizado por Y. Ren et al., 2022, se propuso el análisis de métodos como el Bio Desgomado Progresivo de Fermentación en estado Sólido donde el objetivo fue establecer previamente

las enzimas y los microorganismos a utilizar en las fibras y a pesar de aun estar en proceso de investigación, se evidencio que no es necesario el uso de agua para ninguna de las fases dentro del procedimiento.[18]

En el bio desgomado químico del cáñamo es posible denotar que las fibras necesitan ser expuestas a diferentes condiciones físico-químicas variando entre estados de alcalinidad y acidez que permiten la remoción de residuos como lignina, pectina y hemicelulosas sin llegar a causar degradación de la celulosa. En contraparte el desgomado biológico puede presentarse de dos formas dependiendo del pretratamiento que se realice en el tallo de la planta antes de bio desgomar. En el pretratamiento que se realiza con poblaciones bacterianas, el desgomado se considera microbiológico y en él se inicia enriqueciendo el material con polisacáridos que tienen el papel de contribuir con el crecimiento de microorganismos que sean capaces de producir enzimas extracelulares con la función de degradar todas las impurezas diferentes de la celulosa. Mientras que en el método enzimático se inicia con la adición de cofactores que estimulan la degradación de dichas impurezas a través de enzimas específicas para este proceso.[19]

El desgomado que se realiza a nivel físico usualmente se considera más una fase de pretratamiento de las fibras porque no alcanza a lograr la purificación adecuada del material, dentro de este mismo podemos encontrar métodos como la saturación con CO₂, vaporización y el ultrasonido, estos procedimientos tienen el objetivo de abrir brechas entre las moléculas de hidrogeno y la celulosa por las que puedan entrar a penetrar otras sustancias tales como enzimas, soluciones alcalinas y reactivos que catalizan las reacciones de degradación. [20]

Producción y obtención de PHB

Dentro de la industria de los plásticos, los PHA (Polihidroxialcanoatos) y especialmente el PHB (Polihidroxibutirato) son biopolímeros de gran importancia debido a las características de termoestabilidad que poseen. Estos biopolímeros pueden ser sintetizados por algas o bacterias a nivel intracelular en condiciones de estrés metabólico, con el propósito de almacenar en gránulos carbono y energía hasta el punto en que ocupan gran parte de su porcentaje de peso en ellos. [21] [18]

La producción de PHB por parte de la bacteria *Cupriavidus necator* inicia como el ciclo que realizan los demás microorganismos productores de PHAs, es decir, tiene una etapa que consiste de 3 fases y la intervención de 3 enzimas principalmente, orientado a un proceso de pseudo fermentación de la Acetil CoA y la acción coadyuvante de los genes phaA phaB y phaC (figura 2) [22]

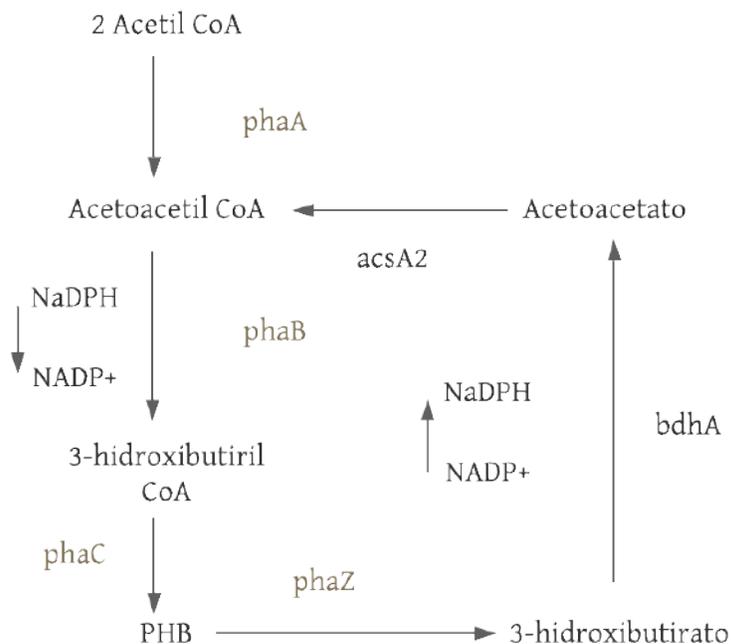


Figura 2. Ciclo de Producción de PHB (Polihidroxiacetato) por parte de *Cupriavidus necator*. Tomada [22]

A nivel de pre tratamiento la bacteria es sometida a una sobresaturación de fuentes de carbono y posteriormente esa suplementación es interrumpida abruptamente con el propósito de que haya mayor biodisponibilidad de materiales para la posterior formación de los gránulos como reservas de almacenamiento de carbono ricos en biopolímeros. Es posible realizar un análisis de la formación de granulos a través de tinciones como Negro Sudan para su posterior observación por microscopia y así denotar si la bacteria realmente formo el material esperado. Se debe proceder a la extracción de los mismos mediante soluciones alcohólicas que se utilizan para romper la pared celular y liberar el PHB del interior de la bacteria, luego a través de procesos de ultracentrifugación se sedimentan las células que contienen altas cantidades de polímero acumulado para posteriormente realizar un tratamiento con diferentes compuestos entre ellos el cloroformo, este ultimo actua como un solvente en cuyo caso se filtra para que al final se pueda eliminar el material que no se haya alcanzado a disolver, de esta manera obtener el PHB puro, como es descrito por M. Narayanan et all. 2020 y S.M Handy et all. 2022.[23][24]

Creación de Composites

Estableciendo que un composite es una aleación o combinación de diferentes materiales, en este caso el composite a formar es a partir de la celulosa de cáñamo y la combinación que se puede generar al añadirle o suplementar con los PHB (polihidroxiacetato) obtenidos a partir de *Cupriavidus necator*. Lo primero que se debe tener en cuenta para poder realizar una aleación, entre material de origen vegetal como la fibra de cáñamo con biopolímeros producidos por diferentes microorganismos como el PHB de *Cupriavidus necator*, es que son materiales que no se adhieren con facilidad entre ellos, puesto que tanto el material vegetal como los biopolímeros son altamente hidrofóbicos por el grupo -OH terminal que tienen en su estructura molecular, aun así estudios sugieren que se utilicen reactivos como CH₃COOH, NaOH y H₂O₂ que por

su carga puedan facilitar el acoplamiento, sin embargo se ha denotado que la mejor opción es tener un copolímero que haga la función de puente entre las moléculas de celulosa y las que componen a los biopolímeros. [25]

A pesar de las diferentes formas que existen para producir un plástico biodegradable, actualmente es difícil denotar el mismo procedimiento para fibras vegetales diferentes que se puedan llegar a utilizar como componentes para que hagan parte de los mismos. Es decir, el proceso de fabricación de los plásticos en general es denominado polimerización durante este proceso moléculas pequeñas llamadas monómeros interactúan para realizar uniones con otras moléculas para formar grandes redes que se reconocerán como polímeros. A pesar de lo importante que resulta ser este proceso para la formación de plásticos tanto la celulosa como el PHB ya son compuestos complejos de gran tamaño que no requieren una fase polimerizada, según la metodología descrita por F. Touchaleaume, et al. 2019. Para la formación de biocomposites o aleaciones con fibras de cáñamo y PHB es necesario hacer que los compuestos tratados previamente con temperaturas de entre 45 a 80 C para secarlos y posteriormente someterlos a ciclo de Extrusión. [26][27]

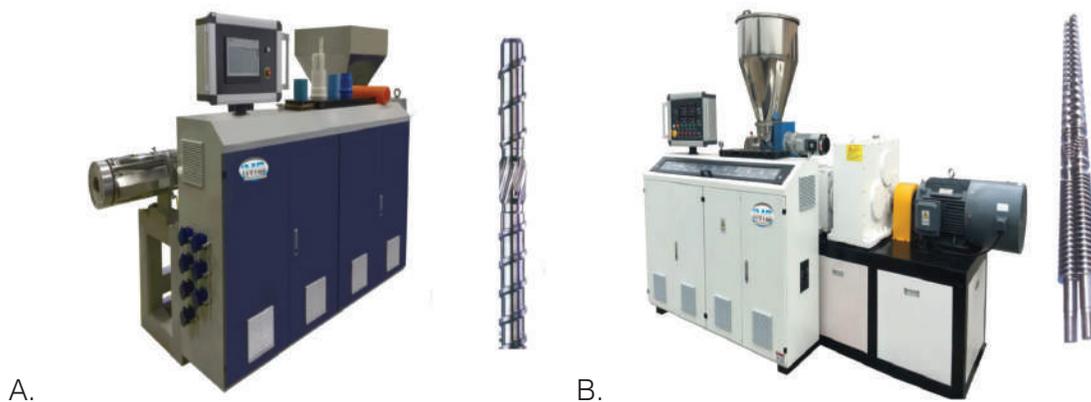


Figura 3. A) Máquina Extrusora de Tornillo Sencillo. B) Máquina Extrusora de Doble Tornillo. Fuente: [28].

Las máquinas extrusoras son clasificadas como máquinas de un solo tornillo o dos tornillos (ver figura 3) dependiendo de la cantidad de fibras a combinar, polímeros a procesar y demás características que se desean procesar en el plástico. Para iniciar el proceso se introducen los compuestos en la tolva de la máquina, que en este caso serían los obtenidos del procesamiento de la fibra de cáñamo junto con el PHB obtenido a partir de la bacteria en forma de pellet después de que se realiza el pretratamiento térmico, para que pasen a través de un conducto que los dirige a un tornillo giratorio cuyo diseño depende del tipo de máquina extrusora y la cantidad de material a procesar, la rotación del tornillo hace que el plástico pase por un cilindro precalentado para que el material se vaya comprimiendo. Durante este proceso el plástico se funde para que pueda pasar por la matriz hasta la parte del troquel donde finalmente será moldeado según se haya dispuesto en un principio. [29][30]

Discusión y conclusiones

En la actualidad resulta ser de mucha importancia la implementación de procesos y metodologías que no comprometan gravemente el estado de los cuerpos hídricos, suelos, aire, fauna, flora y ecosistemas en general. Uno de los materiales más contaminantes a nivel mundial siempre ha sido el plástico, sobre todo los que hacen parte del grupo de plásticos de un solo uso ya que se utilizan una única vez y posteriormente se desechan incorrectamente para que

terminen en zonas donde no deberían. La problemática que se tiene con este tipo de plásticos y los plásticos petroquímicos en general es que no solo tardan mucho tiempo en degradarse sino que también requieren de químicos contaminantes para su fabricación.[31]

Cannabis sativa se ha posicionado a nivel industrial como uno de los materiales de origen vegetal más importantes por la capacidad que tiene de contribuir al secuestro de carbono en el aire y el sin fin de productos de diversa índole que se pueden obtener de diferentes partes de la planta. La fibra de la misma resulta ser un desecho industrial cuando se utiliza el fruto y demás para propósitos medicinales o de producción de aceites, para aprovecharlo se ha estudiado la posibilidad de emplear la celulosa de su fibra como un material termoresistente, fuerte y dinámico que pueda utilizarse como plástico y al ser desechado aunque sea de forma incorrecta logre degradarse sin dejar ningún tipo de residuo o contaminaciones en el suelo o el agua.[31][32]

Para poder realizar un tratamiento correcto de las fibras es necesario llevar a cabo procesos de enriado y bio desgomado y a pesar de las diferentes alternativas que se han estudiado para poder cumplir con estos propósitos evitando la exposición de las fibras a agentes químicos y el gasto excesivo de recursos como el agua, en el caso del bio desgomado si bien ya tiene varias mejoras habría que analizar a fondo de qué manera el proceso podría reducir considerablemente la cantidad de agua que se requiere utilizar, la metodología propuesta por Y. Ren et al.,2022 efectivamente logra posicionar el Bio Desgomado Progresivo de Fermentación en estado Sólido como un método más ecológico y de mayor eficacia al aumentar la resistencia de las fibras y no generar daños en la cadena molecular de la celulosa que se extrae de las mismas. [18]

El uso de fibras de origen vegetal a pesar de presentar complicaciones al unirse con polímeros para la generación de bioplásticos, se ha posicionado como una alternativa para disminuir el riesgo de contaminación por materiales plásticos fósiles, los procesos de tratamiento de las partes de la planta a utilizar siguen presentando algunas falencias pero al 2023 han venido mejorando la cantidad de recursos renovables que se pueden utilizar para la fabricación de plásticos biodegradables que son de alta demanda en el mercado, es inevitable cambiar la forma en que al final se condensan los compuestos obtenidos a través de la planta y la bacteria pero al final el composite que resulta de ambas cosas se caracteriza por ser fuerte, resistente, fácilmente moldeable y manipulable pero sobre todo y más importante biodegradable.

Referencias

- [1] Perspectiva sobre el estudio “Breaking the plastic wave” LA SOLUCIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR A LA CONTAMINACIÓN DE PLÁSTICO. Ellen MacArthur foundation. [Internet]. 2020 [Consultado 05-05-2023]. Disponible en: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/PEW-resumen-ejecutivo.pdf>
- [2] Braking the plastic wave. A comprehensive assesment of path ways toward stopping ocean plastics pollution. SYSTEMIQ. [Internet]. 2020. [Consultado 05-03-2023]. Disponible en: https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/07/BreakingThePlasticWave_ExecutiveSummary.pdf
- [3] Sumpter L. ¿Podría el plástico de cáñamo cambiar el mundo? [Internet] CANNA CONNECTION. 2020 [Consultado 05-05-2023]. Disponible en: <https://www.cannaconnection.com/es/blog/18298-podria-plastico-canamo-cambiar-mundo#:~:text=En%20el%20entorno%20adecuado%2C%20los,hasta%20450%20a%C3%B1os%20en%20degradarse.>
- [4] Fassio A, Rodríguez M y Caretta s. CÁÑAMO (Cannabis Sativa L). 1th edición. Uruguay. INIA; 2013. Disponible en: https://catalogo.latu.org.uy/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2348
- [5] Lemos C y Cordoba A. Polihidroxialcanoatos (PHA) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial. Informador Técnico (Colombia). [Internet]. 2015. [Consultado 10-04-2021]. 79(1). Disponible en: <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/Dialnet-Polihidroxialcanoatos PHAs Producidos PorBacteriasYSu-5290930.pdf>
- [6] Brigham C. Perspectivas for the biotechnological production of biofuels from CO2 and H2 using *Ralstonia eutropha* an other 'kallgas' bacteria. Springsteen. [Internet]. 2019.[consultado 10-04-2021]

- [7] Li Z, Xin X, Xiong B, Zhao D, Zhang X, Bi C. Engineering the calvin - benson - básicamente cycle and hidrógeno utilization pathway of *Ralstonia eutropha* for improved autotrophic growth and Polyhydroxybutyrate production. BCM. [Internet].2020 [Consultado 01-02-2022]; 19(228).
- [8] Díaz A. Identificación y enriquecimiento de un consorcio bacteriano en aguas y lodos residuales de origen doméstico para producir biopolímero del tipo polihidroxialcanoatos PHA´s: Revisión documental. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. [Internet]. 2021. [Consultado 05-03-2023]. Disponible en: <https://repositorio.unicolmayor.edu.co/bitstream/handle/unicolmayor/5606/Identificaci%3%b3n%20y%20enriquecimiento%20de%20un%20consorcio%20bacteriano%20en%20aguas%20y%20lodos%20residuales%20de%20origen%20dom%3%a9stico%20para%20producir%20biopol%3%admeros%20del%20tipo%20polihidroxialcanoatos%20PHA%e2%80%99s%20revisi%3%b3.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [9] García D. Establecimiento de una estrategia para la producción de PHA de *Ralstonia eutropha* ATTC 17699. Universidad de Antioquia. [Internet]. 2023. [Consultado 05-05-2023]. Disponible en: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/33677/1/Garc%3%adaDavid_2023_Biopol%3%admerosEstrategiaVinaza%20-%20.pdf
- [10] Alcaraz W, Acosta A y Villa A. Evaluación de la producción de polihidroxialcanoatos (PHAs) de aislado bacteriano, empleando hidrolizados de harina de yuca con sustrato alternativo. DYNA. [Internet]. 2018. [Consultado 01-02-2022]. Disponible en: https://media.proquest.com/media/hms/PFT/1/NlbC9?_s=njQT9dqD7LUzMjZLdY8OakpmZoU%3D
- [11] Vargas Y, Pasmíño J, Javier D. Revista politécnica [internet].2021[consultado 15-06-2022]. 48(2). Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v48n2/2477-8990-rpolit-48-02-7.pdf>
- [12] CONPES. Política de crecimiento verde. Departamento nacional de planeación. [Internet]. 2018. [Consultado 10-04-2021]. Disponible: página oficial del CONPES
- [13] Pertuz A., Benavides R. (2021). Alternativa verde: Bioplásticos elaborados con biopolímeros de origen renovable - revisión. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Vol. 2 Núm. 1 Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/wpecbti/article/view/4793/5184>
- [14] E. Xanthopoulou et al, "Evaluation of Eco-Friendly Hemp-Fiber-Reinforced Recycled HDPE Composites," Journal of Composites Science, vol. 7, (4), pp. 138, 2023. Available: <https://ezproxy.unicolmayor.edu.co/login?url=https://www.proquest.com/scholarly-journals/evaluation-eco-friendly-hemp-fiber-reinforced/docview/2806541717/se-2. DOI: https://doi.org/10.3390/jcs7040138>.
- [15] B. Farinon, R. Molinari, L. Costantini y N. Merendino, "La semilla de cáñamo industrial (*Cannabis sativa* L.): calidad nutricional y funcionalidad potencial para la salud y la nutrición humanas", Nutrients , vol . 12, núm. 7, pág. 1935, junio de 2020, doi: 10.3390/nu12071935.
- [16] Musio S, Müssig J y Amaducci S (2018) Optimización de la producción de fibra de cáñamo para aplicaciones de compuestos de alto rendimiento. Frente. ciencia de las plantas 9:1702. doi: 10.3389/fpls.2018.01702
- [17] F. Iucolano, B. Liguori, P. Aprea, and D. Caputo, "Evaluation of bio-degummed hemp fibers as reinforcement in gypsum plaster," vol. 138, pp. 149–156, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.11.037. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817322023>
- [18] Y. Ren et al., "A new method for bio-degumming in less-water environment: Solid-state-fermentation progressive bio-degumming," vol. 183, p. 114986, 2022, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.114986.
- [19] Cheng, Lifeng & Duan, Shengwen & Feng, Xiangyuan & Zheng, Ke & Yang, Qi & Xu, Huan & Luo, Wei & Peng, Yuande. (2020). Ramie-degumming methodologies: A short review. Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 15. 155892502094010. 10.1177/1558925020940105.
- [20] R. Abraham, C. Wong, and M. Puri, "Enrichment of Cellulosic Waste Hemp (*Cannabis sativa*) Hurd into Non-Toxic Microfibres," Materials, vol. 9, no. 7, p. 562, Jul. 2016, doi: 10.3390/ma9070562. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/ma9070562>
- [21] S. Behera, M. Priyadarshane, Vandana, and S. Das, "Polyhydroxyalkanoates, the bioplastics of microbial origin: Properties, biochemical synthesis, and their applications," vol. 294, p. 133723, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133723.
- [22] Zhang, L., Jiang, Z., Tsui, T. H., Loh, K. C., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2022). A Review on Enhancing Cupriavidus necator Fermentation for Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) Production From Low-Cost Carbon Sources. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 10, 946085. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.946085>
- [23] Hamdy, S.M., Danial, A.W., Gad El-Rab, S.M.F. et al. Production and optimization of bioplastic (Polyhydroxybutyrate) from *Bacillus cereus* strain SH-02 using response surface methodology. BMC Microbiol 22, 183 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02593-z>

- [24] M. Narayanan, S. Kandasamy, S. Kumarasamy, K. Gnanavel, M. Ranganathan, and G. Kandasamy, "Screening of polyhydroxybutyrate producing indigenous bacteria from polluted lake soil," vol. 6, no. 10, p. e05381, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05381.
- [25] O. Y. Buitrago, P. J. Rodríguez, and M. J. Monroy, "Biodegradación Temprana en Suelo de Biocompuestos Elaborados con Poli-3-hidroxi-butarato, Policaprolactona y Aserrín de Cannabis Indica-Rusia Blanca," vol. 29, no. 6, pp. 103–112, 2018.
- [26] Touchaleaume, Francois & Tessier, Romain & Caillol, Sylvain & Hoppe, Sandrine & Angellier-Coussy, H el ene. (2019). Polyhydroxybutyrate/Hemp Biocomposite: Tuning Performances by Process and Compatibilization. *Green Materials*. 7. 1-10. 10.1680/jgrma.19.00005.
- [27] Acquavia, M. A., Pascale, R., Martelli, G., Bondoni, M., & Bianco, G. (2021). Natural Polymeric Materials: A Solution to Plastic Pollution from the Agro-Food Sector. *Polymers*, 13(1), 158. <https://doi.org/10.3390/polym13010158>
- [28] Mesa, C. (2023). Maquinas de Extrusi n Tornillo Doble y Tornillo Sencillo. IMS, <https://maquinariaparaplasticos.com/maquinas/maquinas-extrusion-tornillo-doble/>
- [29] M. Hyv arinen, R. Jabeen, and T. K arki, "The Modelling of Extrusion Processes for Polymers—A Review," *Polymers*, vol. 12, no. 6, p. 1306, Jun. 2020, doi: 10.3390/polym12061306. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/polym12061306>
- [30] (2023). What is plastic extrusion?. TWI, recuperado de: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/plastic-extrusion#:~:text=Plastics%20extrusion%20is%20a%20normally,drops%20on%20a%20rotating%20screw.>
- [31] McAdam, B., Brennan Fournet, M., McDonald, P., & Mojicevic, M. (2020). Production of Polyhydroxybutyrate (PHB) and Factors Impacting Its Chemical and Mechanical Characteristics. *Polymers*, 12(12), 2908. <https://doi.org/10.3390/polym12122908>
- [32] Ahmed, A. T. M. F., Islam, M. Z., Mahmud, M. S., Sarker, M. E., & Islam, M. R. (2022). Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review. *Heliyon*, 8(1), e08753. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08753>

Hacia el mejoramiento de la gestión de activos de equipos críticos en Pymes: propuesta de metodología e implementación

Towards the enhancement of asset management of critical equipment in SMEs: methodology and implementation proposal

Miguel Ángel Segura-Monge¹, Gustavo Adolfo Gómez-Ramírez², Greivin Barahona-Guzmán³, Juan José Montero-Jiménez⁴

Fecha de recepción: 18 de abril, 2023
Fecha de aprobación: 6 de octubre, 2023

Segura-Monge, M.A; Gómez-Ramírez, G.A; Barahona-Guzmán, G; Montero-Jiménez, J.J. Hacia el mejoramiento de la gestión de activos de equipos críticos en Pymes: propuesta de metodología e implementación. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 95-108.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6699>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: miguelseguracr@gmail.com
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gbarahona@itcr.ac.cr
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: juan.montero@itcr.ac.cr

Palabras clave

Gestión de activos; activos críticos; Pyme; ciclo de vida de los activos.

Resumen

Las Pymes son pequeñas y medianas empresas que nacen a partir de una idea de comercialización de un producto o servicio. El crecimiento de estas empresas conlleva un aumento en la complejidad de su organización. Desde el aumento de la estructura interna hasta la relación con algunos actores externos, como entes reguladores y fiscales, supone retos para los cuales no siempre se cuenta con la preparación adecuada o no se tiene claro el camino más eficiente para afrontarlos. Un ejemplo de esto se puede observar con la gestión de los activos de la empresa, el cual con frecuencia es rudimentario y no se tiene noción cuantificada de la criticidad de los activos para el negocio de la Pyme. A partir de un Modelo de Gestión de Activos una Pyme puede trazar una ruta hacia un aprovechamiento eficiente de sus activos, evitando gastos innecesarios en reparaciones, así como problemas que pueden afectar la continuidad del negocio. Este mejor aprovechamiento de los activos resulta en un mayor valor al modelo de negocio de la Pyme. La presente nota técnica plantea una metodología para la implementación de Gestión de Activos basada en la norma INTE/ISO 55001. El objetivo es la adaptación de los diferentes pasos para la implementación temprana de Modelos de Gestión de Activos que son usuales en empresas consolidadas de gran tamaño en pequeñas y medianas empresas. Dicha metodología fue validada en un caso de estudio real en una mediana empresa de Costa Rica. Los resultados no solo evidenciaron la gestión rudimentaria de activos en Pymes si no también la viabilidad de implementar un Modelo de Gestión de Activos en etapas tempranas de las Pymes.

Keywords

Asset management; critical equipment; SMEs; asset life cycle.

Abstract

SMEs are small and medium-sized enterprises that arise from an idea of marketing a product or service. The growth of these companies entails an increase in the complexity of their organization. From the increase in internal structure to the relationship with some external actors, such as regulatory and fiscal entities, it poses challenges for which adequate preparation is not always available or the most efficient path to address them is not clear. An example of this can be seen with the management of company assets, which is often rudimentary and there is no quantified notion of the criticality of assets for the SME's business. Through an Asset Management Model, an SME can chart a path towards efficient use of its assets, avoiding unnecessary expenses in repairs, as well as problems that can affect business continuity. This better use of assets results in greater value to the SME's business model. This technical note proposes a methodology for the implementation of Asset Management based on the INTE/ISO 55001 standard. The objective is to adapt the different steps for the early implementation of Asset Management Models that are common in large consolidated companies to small and medium-sized enterprises. This methodology was validated in a real case study in a medium-sized SME company in Costa Rica. The results not only showed the rudimentary asset management in SMEs but also the viability of implementing an Asset Management Model in early stages of SMEs.

Introducción

Uno de los mayores retos de las Pequeñas y Medianas Empresas (Pymes) es sobrevivir en un mercado frecuentemente reducido, lleno de competencia y de variables que constantemente amenazan la continuidad del negocio. En estas etapas tempranas de las empresas, muchas herramientas especializadas de gestión cuyo retorno de inversión no es en apariencia inmediato, tienden a ser ignoradas por los emprendedores. Un ejemplo de ello está en la gestión de activos que frecuentemente es muy rudimentario en las etapas incipientes de las empresas, donde se ignora el verdadero impacto que podría generar un Modelo de Gestión de Activos.

Lo que corresponde a la gestión de activos es [1] [16] “La actividad coordinada de una organización para obtener valor de los activos”. Así mismo, para [2] [13][14], el impacto que tiene la gestión de activos en las finanzas organizacionales es grande, ya que al unir los ejercicios prácticos de la implementación de gestión de activos con elementos financieros; es posible obtener implementaciones mientras se gerencia en torno a un crecimiento sostenible de la empresa. También [3][12], sostienen que una integración efectiva del mantenimiento con otras funciones de producción en la organización, permiten ahorrar grandes cantidades de tiempo, dinero y otros recursos en la gestión de las necesidades, disponibilidad y problemas de rendimiento. Por otra parte [4][20], afirma que, para los administradores de flotas, el mayor beneficio que se puede obtener a nivel de flota con la gestión de activos es un mayor tiempo de actividad, utilizando un mantenimiento más efectivo y proactivo que permite a los vehículos mayor tiempo en carretera y minimizar los costos e interrupciones en el servicio.

Para [5] y [18], la gestión de activos busca la reducción de costos y mejora de la eficiencia de estos, siendo uno de los mejores instrumentos que afectan de forma positiva la liquidez de la empresa, aún con el desconocimiento que se tiene de su existencia y aplicación en ámbito empresarial. Por otra parte, [6] y [15] afirman que, la estrategia para la gestión de activos debe estar alineada con el entorno, ambiente y cultura organizacional, con la finalidad de llegar a la mayor cantidad de colaboradores posible. Considerando que el objetivo de evitar sobrecostos o pérdidas respecto al retorno de la inversión es necesario el monitoreo constante de los activos; tema que incumbe de forma primaria al departamento de mantenimiento, desde el momento de la adquisición de los activos para prolongar su vida útil. Este proceso es independiente del tamaño de la organización. Según [7] y [17], toda empresa cuenta con activos físicos de los que espera generar utilidades económicas, su confiabilidad estratégica y su imagen ante el cliente pueden verse disminuidas sin una adecuada gestión. Por este motivo es que ha aumentado la importancia a nivel global de la gestión de los activos físicos corporativos, con la finalidad de forjar un sistema de gestión que asegure el máximo rendimiento y vida útil de los activos. Este proceso requiere, según [8], que las empresas a nivel global conozcan cada etapa del activo fijo, así como los riesgos a los que están expuestas en cada una de estas empresas. Esta información debe ser informada a todo el personal y a los líderes de la compañía, de modo que se pueda determinar una hoja de ruta, o plan a seguir, en el cual se plasmen las mejores y más adecuadas prácticas para el control y gestión de los activos fijos. Resulta importante que se tenga en cuenta el tamaño de la organización al definir estas prácticas. Como lo expresa [9], el mantenimiento históricamente ha aportado al desarrollo industrial. No obstante, en una gran mayoría de sectores no recibe un lugar dentro del proceso productivo; más aún, ni siquiera se considera durante la gestión de activos físicos. El área de mantenimiento suele ser una oficina de emergencias, que se considera solamente cuando se produce alguna falla que detiene la cadena de producción.

Para [10], la gestión de activos es la actividad coordinada de una organización que permite obtener valor por medio de sus activos. Esto implica un balance de costos, riesgos, oportunidades y beneficios de desempeño. Implementar un plan de gestión de activos para la

flota vehicular, montacargas y línea de empaque, es vital para una Pyme, pues este grupo de activos representa uno de los elementos principales para el giro de negocio y cuyos paros no programados representan pérdidas que pueden comprometer la estabilidad del negocio.

Por lo tanto, la gestión eficaz y eficiente de estos activos, así como un proceso optimizado de su mantenimiento, garantiza la rentabilidad de su inversión, trayendo como consecuencia un impacto positivo en las finanzas de la empresa e información certera para facilitar la toma de decisiones [19]. Sin embargo, la mayoría de las Pymes no cuentan con indicadores de mantenimiento asociados a la trazabilidad de los gastos operativos de sus activos, no cuenta con métricas para evaluar el origen del gasto, el tipo de mantenimiento adecuado, el impacto en costos de operación y la eficiencia logística, lo que al final tiene repercusiones financieras y por ende afectación en la competitividad del negocio. Entonces, ¿Cómo puede una Pyme desarrollar un modelo de gestión de activos, que determine los activos críticos, y su adecuada gestión, evitando gastos por paros no programados? Esta es la pregunta que motivó la presente investigación. Las metodologías existentes no presentan una adaptación eficaz para Pymes. A partir de la Norma INTE/ISO 55001, se presenta una adaptación para la implementación de un Modelo de Gestión de Activos en empresas pequeñas.

La presente nota técnica se divide de la siguiente forma: la sección de 2 muestra los pasos seguidos para adaptar la Norma INTE/ISO 55001 para la implementación de un Modelo de Gestión de Activos en Pymes. La sección 3 resume la implementación de la metodología propuesta en una Pyme real en Costa Rica; además, se presentan y discuten los hallazgos y logros más relevantes de la implementación. Finalmente, la sección 4 presenta las reflexiones finales de la nota técnica, así como las perspectivas de trabajo futuro.

Metodología

El camino planteado para la implementación del plan de gestión de activos inicia con los distintos elementos del modelo basados en la norma INTE/ISO 55001 que corresponde a los interesados (llamados stakeholders en inglés), como los clientes, la junta directiva y los proveedores.

Posteriormente sigue el recorrido por el contexto de la organización, hasta llegar a los elementos de liderazgo, planificación, apoyo, operación, evaluación del desempeño y mejora; para finalmente establecer en qué forma la interacción de estos elementos afectan el ciclo de vida de los principales activos de la compañía. La Figura 1 resume los principales pasos señalados en la norma INTE/ISO 55001 los cuales son descritos a continuación:

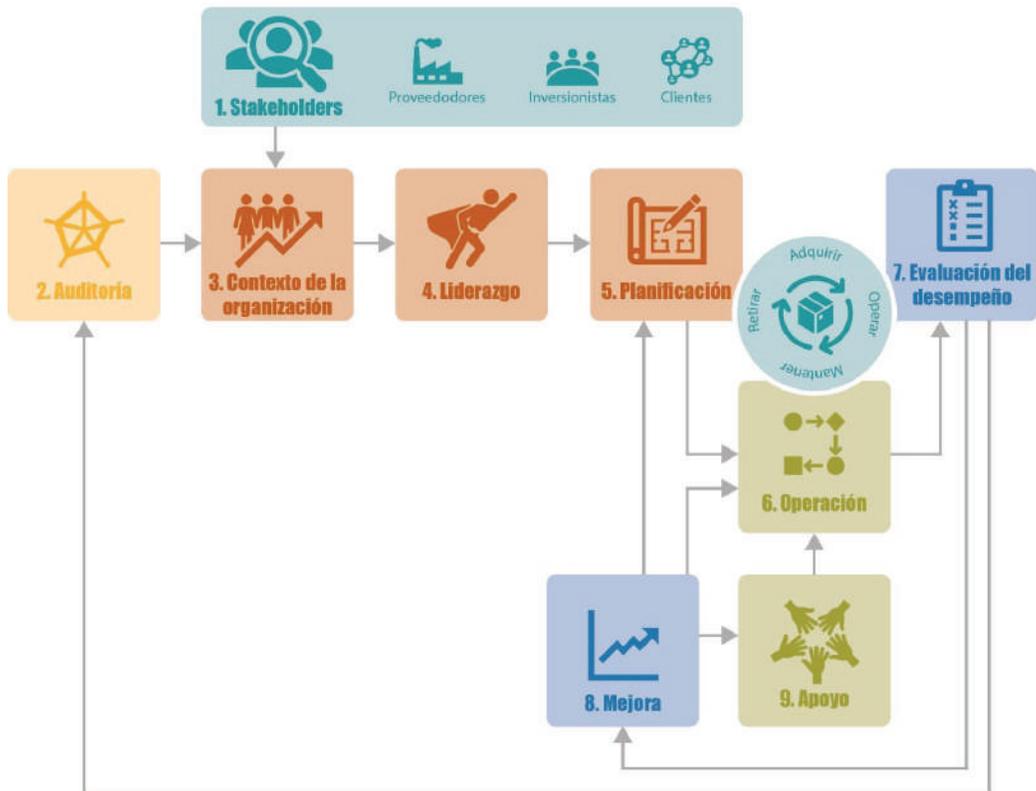


Figura 1. Modelo de gestión de activos para una Pyme.

Interesados

Los principales interesados (*stakeholders*) de forma directa o indirecta en el desarrollo de un modelo de gestión de activos pueden ser los clientes, los inversionistas y los proveedores.

Auditoría

Se realiza una auditoría basada en la Norma ISO 55001, y se determinan los destinatarios a los que se les aplica la auditoría, con el objetivo de conocer el nivel de cumplimiento de la empresa respecto a la norma en temas de gestión de activos.

Contexto de la organización

El contexto de la organización es el elemento del modelo de gestión de activos que unifica los objetivos y alcances de un sistema de gestión de activos con los objetivos y planes de la organización que han sido propuestos por la Alta Dirección de la empresa y se consideran temas que van desde aspectos financieros, hasta tecnológicos. Este contexto organizacional debe tener en cuenta el organigrama de la compañía, para que al establecer las estrategias haya la mayor armonía posible entre los distintos departamentos, ya que el día a día de la actividad y la relación entre departamentos puede generar confusiones en la dirección y se debe aclarar dudas sobre el proceso.

Liderazgo

El liderazgo como elemento para la implementación del modelo de gestión de activos, es determinante para que se cumplan los objetivos y políticas de gestión de activos, ya que desde la alta dirección se puede impregnar al resto de la compañía la información y compromiso con los objetivos y políticas de la gestión de activos, alineándose con los objetivos de la organización y haciéndolo parte de la cultura organizacional.

Desde la alta dirección se puede contar el apoyo financiero necesario para la gestión de activos, también puede dar el monitoreo y seguimiento para que las distintas jefaturas cumplan los objetivos del plan de gestión activos.

Planificación

Tanto los objetivos organizacionales como los del plan de gestión de activos son o al menos deberían ser fruto de la planificación estratégica de la compañía y se establecen a partir de las peticiones o indicaciones que se dan desde la Junta Directiva, posteriormente se reúnen las personas relacionadas a proyectos en caso de no existir un departamento de proyectos, la cual se encarga de asignar responsables y el cronograma para llevar a cabo los objetivos. En la planeación se determina el ciclo de vida de activos estratégicos que pueden tener impacto directo en el riesgo, plazos de adquisición y costos asociados.

Es donde se puede proponer planes de mantenimiento, TPM y el análisis de criticidad de los equipos.

Como medida inicial para analizar la criticidad de los activos, se puede utilizar la norma internacional Norsok Standard Z-008(2011) que es una norma noruega, especializada en satisfacer necesidades de especialización de equipos.

Para definir los análisis de criticidad es necesario efectuar una jerarquización de activos y la definición de los factores de criticidad son determinados por cada organización de acuerdo con los objetivos organizacionales, así como la visión y misión.

Criterios de consecuencias.

Los criterios de consecuencias son los principales indicadores en términos de impacto en el negocio, en los que la indisponibilidad o falla de un activo puede tener consecuencias en uno o más tipos de impacto, y para cada uno de ellos se establece un indicador numérico con su respectiva descripción y el criterio que se ve afectado.

Cada tipo de impacto, así como los criterios; son definidos según el tipo y objetivos del negocio y abarcan desde el impacto en la satisfacción del cliente hasta el impacto en el ambiente.

Una compañía que tiene identificados los tipos de impacto de cada activo puede llevar a cabo planes y estrategias para que el indicador siempre se mantenga en el mayor valor estimado, lo que aumenta la posibilidad de proyectar en la compañía una imagen de calidad, seriedad, seguridad y rentabilidad; puntos que son altamente valorados por los interesados.

Indicadores de criticidad

El indicador de criticidad (o riesgo) depende de la frecuencia de falla (cuadro 1) que se ha definido en función de los mantenimientos correctivos que se han realizado a lo largo de un periodo de tiempo definido para obtener información del MTBF (Tiempo medio de entre fallas, por sus siglas en inglés) de un activo, en el que se puede ubicar según el índice el tiempo en meses entre una falla y otra.

Cuadro 1. Frecuencia de falla.

Índice	Definición	Criterio MTBF (meses)
5	Muy probable	< 3
4	Probable	3 a 6
3	Algo probable	6 a 9
2	Poco probable	9 a 12
1	No probable	>12

Ecuación 1: $R(t)=F(t) * C(t)$

Donde:

$R(t)$ = Riesgo o criticidad.

$F(t)$ = Índice de Frecuencia de Fallos.

$C(t)$ = Consecuencias = (Impacto satisfacción del cliente + Impacto en la calidad del producto + Impacto en la seguridad + Impacto en la rentabilidad) /4

Posteriormente se establece la matriz de criticidad que se puede observar en la figura 2, para la cual según la ubicación de frecuencia de fallo se utiliza el eje vertical enumerando cada fila del uno al cinco, mientras que el promedio del impacto o consecuencia se encuentra en el eje horizontal enumerando las columnas del uno al cinco, esto da por resultado la ubicación de criticidad del activo según el color que le corresponda, en el que si un activo es ubicado en una casilla color rojo, pertenece a un activo Crítico, mientras que una casilla color amarillo pertenece a un activo Medianamente crítico y finalmente una casilla color verde pertenece un activo No crítico.

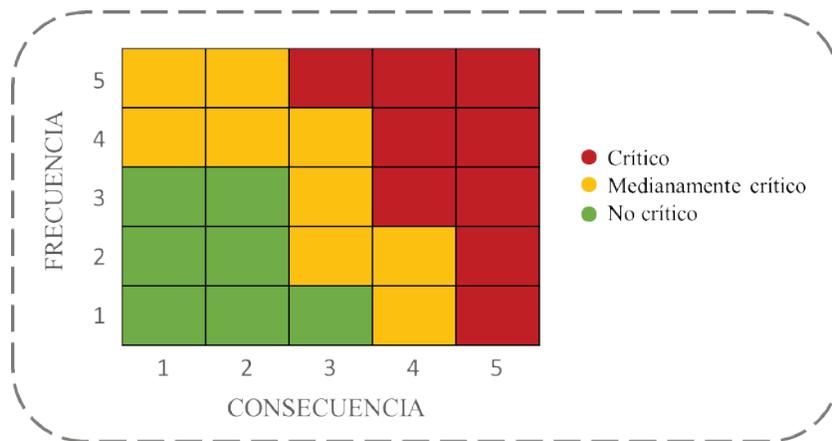


Figura 2. Matriz de criticidad.

Operación

El elemento de operación es uno de los puntos medulares del modelo de gestión de activos que se intersecan con el ciclo de vida de estos. Este elemento se ve afectado directamente por la planeación, el apoyo y la mejora. A su vez, la operación afecta de forma directa la evaluación del desempeño. Aquí es donde se gestionan y controlan puntos que fueron planeados previamente tanto a nivel del plan de gestión de activos, como nivel de control de un activo específico dentro del ciclo de vida del activo.

En la operación es donde los actores que llevan a cabo cada proceso tienen claro lo que ha surgido de la planificación y es el espacio en el cual se siguen los protocolos o procesos establecidos, se ejecutan los mantenimientos, se establece cuáles activos se van a someter a mantenimiento subcontratado y cuáles a mantenimiento interno.

Se hace preciso establecer los protocolos y requerimientos para que los proveedores de servicios de mantenimiento tercerizados estén apegados al plan de gestión de activos.

Se determina quiénes son los responsables internos y los roles que llevan a cabo en la subcontratación de servicios tercerizados, así como el debido seguimiento del cumplimiento por parte de las empresas subcontratadas. Se determina si es necesario que el personal de las empresas subcontratadas sea capacitado para que su trabajo esté alineado a los requisitos establecidos en el plan de gestión de activos.

En la operación también se puede relacionar al ciclo de vida del activo, con temas de indicadores de la condición de estos activos, de esa forma, por medio de tecnologías cuyo principio sea la industria 4.0, es posible pensar en mantenimiento basado en la condición.

Evaluación del desempeño

La evaluación del desempeño según el modelo de gestión de activos está ligada a la mejora y a la operación. Por otra parte, también se encuentra directamente ligada al ciclo de vida de los activos. En la evaluación del desempeño se espera que la empresa haga una evaluación de su sistema de gestión de activos, así como de cada uno de sus activos. Esta evaluación del desempeño puede ser directa o indirecta, además puede ser una evaluación financiera o no financiera. Sin importar si los activos son gestionados por empresas tercerizadas o no, la compañía debe evaluar el desempeño de cada uno de ellos, así como del sistema de gestión de activos. En esta evaluación del desempeño es útil ejecutar cada cierto tiempo la auditoría del estado actual de la empresa en relación con su madurez en términos de sistema de gestión de activos. Así como cualquier auditoría interna que permita determinar el estado de la compañía en términos de los objetivos del plan de gestión de activos y su alineación con los objetivos de la organización. Es en la evaluación del desempeño es donde la incorporación de los KPI adquiere un papel fundamental, y estos indicadores pueden ser para evaluar el comportamiento de la gestión de activos o bien la incorporación de herramientas que permitan obtener indicadores del comportamiento de los activos o sus subsistemas.

Mejora

La mejora continua se puede ver reflejada en los activos, y el sistema de gestión de activos. Tal como se señaló, la mejora es una consecuencia de la evaluación del desempeño, ya que sin información (indicadores) sobre lo que está mal o no se cumple en conformidad, es difícil ofrecer evidencia de algo que está por mejorar. Las acciones preventivas son parte de la mejora y permiten reducir el riesgo al máximo. En muchas ocasiones se dan fallas que fueron anticipadas gracias a una correcta operación y evaluación del desempeño reduciendo el riesgo; sin embargo, una vez dadas esas fallas es posible hacer un nuevo análisis para reducirlas aún más en el futuro.

La norma UNE-EN 15341:2020, establece una serie de indicadores (KPI) sobre “El mantenimiento en la gestión de activos físicos” que son relevantes en búsqueda de la mejora, estos permiten una gestión óptima del ciclo de vida de los activos físicos, permitiendo alcanzar los objetivos de la organización a lo largo del tiempo.

El número de indicadores se puede ampliar según las áreas y la necesidad, la norma incluso propone un cuadro comparativo con el indicador, los factores y comentarios para sacar el máximo aprovechamiento de los KPI.

El sistema de gestión de activos debe contemplar en la mejora, la oportunidad para identificar cualquier situación que comprometa la continuidad del negocio, y cuando se requiera, analizar detalladamente las consecuencias de un posible fallo y reducirlas.

Apoyo

El elemento de Apoyo determina la interacción entre los diferentes departamentos y recursos de la organización de manera que respondan al objetivo de mejora continua de gestión de activos.

El Departamento de Recursos Humanos juega un papel importante en la consolidación del elemento Apoyo, ya que, al interactuar con el sistema de gestión de activos, establece las competencias del personal involucrado con estos, asimismo, este departamento se encarga de la selección del personal capacitado y del proceso de formación, concientización y divulgación relacionada con la gestión de activos.

Los Departamentos de Recursos Humanos y Proyectos, comparten la responsabilidad de documentar la información atinente a la gestión de activos, en temas como normas internacionales y sus requisitos, y de ser requerido establecen canales de coordinación con el Departamento TI, a fin de obtener información valiosa en términos de indicadores.

La correcta comunicación sobre la importancia, roles y los beneficios de la gestión de activos de manera general en la compañía, así como el impacto individual en los departamentos y colaboradores, debe ser un estandarte de las jefaturas y el Departamento de Recursos Humanos.

Resultados

La metodología propuesta anteriormente es aplicada a una Pyme costarricense categorizada como mediana empresa según el MEIC (Ministerio de Economía, Industria y Comercio) que se dedica al empaque y distribución de alimento para mascotas. Se define que los principales interesados son los clientes, los inversionistas y los proveedores. Se incluye a los clientes porque cualquier proceso que haga que la empresa sea más eficiente, se refleja en la calidad de los productos, entregas completas y en tiempos oportunos, y dependiendo del tipo de producto, el cliente puede ver beneficios económicos porque si la empresa reduce sus costos, una parte del capital recuperado se puede reflejar en descuentos y dinámicas comerciales. En el caso de los inversionistas, el principal beneficio es percibir un incremento en el valor de la compañía, ya sea en imagen, respaldo de la calidad e incremento de sus estados financieros. Mientras que los proveedores se benefician en la cadena de valor relacionado a sus productos, ya que la manipulación y entrega de sus productos está a cargo de una compañía preocupada por la mejora continua.

Al realizar una auditoría basada en la Norma INTE/ISO 55001 a las jefaturas de los distintos departamentos como RRHH, Producción, Logística, Mantenimiento, Financiero. Los resultados se tabulan con el objetivo de obtener un gráfico de araña (figura 3) que permita visualizar el escenario actual en términos de cumplimiento de la compañía respecto al ideal propuesto por la norma.



Figura 3. Escenario actual de cumplimiento según auditoría de la norma ISO 55001.

En la figura 3, se puede observar que el único punto que se acerca levemente al escenario ideal es el del contexto de la organización. Salvo el caso anterior, no hay información que muestre que la compañía cumpla de alguna forma con la norma ISO 55001-2020, en alguno de sus principales puntos.

Un ejemplo en el caso de estudio para el contexto de la organización es la asignación de un camión para una ruta específica de reparto, ya que al considerarse elementos como la carga máxima que puede llevar el camión, se puede pensar que el departamento de despacho, que son los que cargan los camiones y conocen el peso que va a llevar cada camión, son los que determinan el camión correcto en términos de capacidad, sin embargo, también hay que considerar a la jefatura de ventas que corresponde a los agentes y choferes porque son los que conocen las rutas y el tipo de carreteras por las cuales está facultado el camión para transitar. Es decir, al final la asignación la realiza la jefatura de ventas, sin embargo, tiene una comunicación cercana con logística, e incluso el departamento administrativo que es donde se asignan los camiones a nivel de sistema y liquidaciones.

Si la alta dirección proyecta su liderazgo en el plan y sistema de gestión de activos, es posible ver resultados en temas de compromiso por parte de los distintos departamentos.

Para analizar la criticidad de los activos, los factores de criticidad fueron establecidos sobre los principales riesgos que puede enfrentar la compañía según su plan estratégico, gerencia y las distintas jefaturas.

Cuadro 2. Tipos de impacto.

Tipo de impacto	Indicador	Descripción	Criterio
Impacto en la satisfacción del cliente.	5	Muy alto	Pérdida del cliente.
	4	Alto	Venta perdida.
	3	Medio	Viaje de entrega perdido.
	2	Bajo	Cliente insatisfecho.
	1	Muy bajo	Cliente satisfecho.
Impacto en la calidad del producto.	5	Muy alto	Producto a desecho.
	4	Alto	Producto reempacado.
	3	Medio	Falla leve de empaque.
	2	Bajo	Calidad satisfecha.
	1	Muy bajo	Excelente calidad.
Impacto en la seguridad.	5	Muy alto	Muerte.
	4	Alto	Accidente grave.
	3	Medio	Accidente leve.
	2	Bajo	Anomalía.
	1	Muy bajo	Sin Accidentes.
Impacto en la rentabilidad.	5	Muy alto	>USD 10 000
	4	Alto	>USD 7 500 a USD 10 000
	3	Medio	>USD 4 500 a USD 7 500
	2	Bajo	>USD 0 a USD 4 500
	1	Muy bajo	USD 0

Inicialmente se define el impacto en la satisfacción del cliente (cuadro 2), ya que día a día la empresa tiene que encontrar la forma de satisfacer las necesidades de cada uno de esos clientes, y es posible perder alguno de ellos por diferentes motivos.

Para el caso del impacto en la calidad del producto, se puede pensar en algún activo relacionado con la línea de producción (reempaque) en la que una falla puede ser tan grave que implique desechar la producción por algún tipo de contaminación.

La seguridad es otro elemento importante, es posible encontrar el caso más extremo como la muerte de una o varias personas, hasta el caso ideal donde el impacto es muy bajo lo que corresponde a la nulidad de accidentes.

Cuando se menciona en el impacto en la rentabilidad, se está evaluando las implicaciones económicas que tiene la indisponibilidad diaria de un activo sin considerar costos asociados al mantenimiento que implique ponerlo en marcha nuevamente. Hay activos cuya falla si es de únicamente un día, tienen un impacto nulo, otros activos como los camiones o la línea de producción tienen impacto en la rentabilidad diaria de USD 10 000 o más.

Es posible aplicar la ecuación 1 a los activos de los departamentos de logística, alisto y producción, con la finalidad de obtener una tabla general (cuadro 3) que ubique cada activo según la matriz anterior y de esa forma en cada departamento quedan ordenados los activos en orden descendente según su Riesgo o criticidad que permite una mejor toma de decisiones en concordancia con el modelo de gestión de activos.

Cuadro 3. Criticidad según activos.

ID	Departamento	Activo	Cantidad	ISC	ICP	IS	IR	C(t)	F(t)	R(t)
A1	Producción y Alisto	Empacadora	1	4	4	3	5	4	4	16
A2	Producción y Alisto	Multicabezal	1	4	4	3	5	4	3	12
A3	Producción y Alisto	Montacargas	1	1	4	5	2	3	3	9
A4	Producción y Alisto	Selladora de banda	1	4	4	4	2	4	2	8
A5	Producción y Alisto	Compresor 5.5 hp	1	4	4	3	5	4	2	8
A6	Producción y Alisto	Banda transportadora	1	1	1	3	2	2	3	6
A7	Producción y Alisto	Selladora de pie	1	4	4	3	2	3	2	6
A8	Producción y Alisto	Carretilla	5	1	3	3	2	2	2	4
A9	Producción y Alisto	Carretillas hidráulicas	4	1	3	3	2	2	2	4
A10	Producción y Alisto	Cosedoras de sacos	3	2	3	1	2	2	2	4
A11	Producción y Alisto	Romanas para sacos	3	2	3	1	2	2	2	4
A12	Producción y Alisto	Fechador	1	2	4	1	2	2	2	4
A13	Producción y Alisto	Compresor respaldo	1	4	4	3	5	4	1	4
A14	Producción y Alisto	Larguero	580	1	3	5	2	3	1	3
A15	Producción y Alisto	Vertical	56	1	3	5	2	3	1	3
A16	Producción y Alisto	Romana verificadora	2	4	4	1	2	3	1	3
A17	Producción y Alisto	Mesas	4	1	1	2	2	2	1	2
A18	Producción y Alisto	Teléfono IP	4	2	1	1	2	2	1	2
A19	Logística	Camión 5 Ton	1	5	3	5	5	5	4	20
A20	Logística	Camión 8.5 Ton	3	5	3	5	5	5	3	15
A21	Logística	Carretilla	4	2	5	3	2	3	4	12
A22	Logística	Camión 13.91 Ton	1	5	3	5	5	5	1	5
A23	Logística	Teléfono celular	4	4	1	1	2	2	2	4
A24	Logística	Caja de seguridad	5	1	1	2	4	2	1	2

Una vez que se establece la tabla de criticidad, es posible ubicar los activos por medio de su ID de forma gráfica en la matriz de la figura 4.

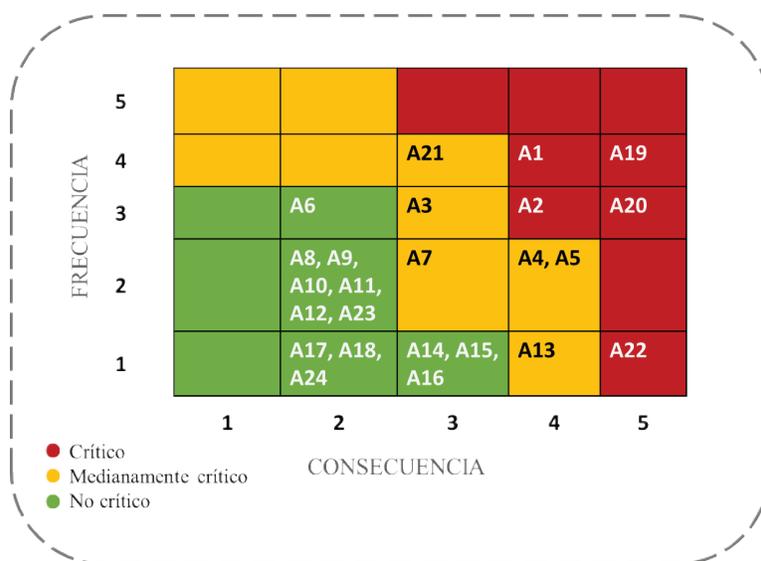


Figura 4. Matriz de criticidad general.

Se puede notar que para la empresa los camiones son los activos de mayor criticidad en el Departamento de Logística, mientras que en alisto y empaque son el multicabezal y la empacadora.

Así el apoyo por parte del Departamento Administrativo, que en la empresa es el encargado de llevar a cabo lo referente a temas financieros, es el que establece junto con Gerencia General y Recursos Humanos, los recursos necesarios y las partidas de financiamiento destinadas a temas de gestión de activos.

Al quedar los camiones categorizados dentro de los activos Críticos, se respalda que cuenten con sensores en las llantas, tanque de combustible, sensores de carga inalámbrica por eje para la suspensión mecánica, e incluso en las puertas del cajón, además del GPS. Todo este conjunto de sensores y herramientas, transmiten información en tiempo real al ERP que, al tener un módulo de flotas, un módulo mantenimiento y reparaciones, así como el módulo de compras; hace posible desde cualquier parte del mundo conocer con mucha precisión información sobre el estado de cada camión, verificando que se está cargando con pesos que no excedan su capacidad.

Información que se puede cruzar con el consumo de combustible, forma de conducción de los choferes, alarmas de estado del camión y propuestas de mantenimiento, que al estar ligado al ERP, es posible hacer órdenes de compra de forma automatizada de repuestos, y programar los mantenimientos. Estos cambios van a permitir la evaluación del desempeño de cada uno de esos activos y la toma de decisiones para el proceso de mejora a la hora de seleccionar la cantidad adecuada de repuestos, la frecuencia de mantenimientos, el seguimiento de parte de las autoridades respectivas para asegurar la continuidad de la operación al menor costo y con el menor impacto posible.

Conclusiones y perspectivas de trabajo futuro

La presente nota técnica demuestra que es factible para las Pymes implementar un Modelo de Gestión de Activos físicos que les permita maximizar el aprovechamiento de sus activos y disminuir la posibilidad de interrupción de la operación.

Determinar la criticidad de los activos, es un paso clave para la implementación del Modelo de Gestión de Activos, dando una guía clara en donde enfocar esfuerzos e inversión para así tener una mejora considerable en el aprovechamiento de los activos físicos.

Un Modelo de Gestión de Activos según la norma INTE/ISO 55001 es adaptable a Pymes. Este se puede resumir en un flujograma de actividades que son aplicables a toda empresa que tenga activos físicos. Dentro de las perspectivas de trabajo futuro se tiene la implementación de la metodología propuesta en más Pymes, documentando los puntos de mejora a metodología y su implementación.

Agradecimientos

El autor principal agradece al Consejo de Unidad de Posgrados de la Escuela de Ingeniería Electromecánica del Tecnológico de Costa Rica y los profesores, por el apoyo brindado durante la elaboración del proyecto, por los conocimientos adquiridos para obtener el grado de maestría.

Referencias

- [1] INTECO. (2015). INTE ISO 55000:2015 *Gestión de activos. Aspectos generales, principios y terminología*.
- [2] Herrera, N. E. N., 2021. *¿Cómo anticipar los resultados financieros de la Gestión de Activos?*.



- [3] Atmadyaya, Sazali, & Hassan, 2021. *Maintenance Strategy for Engine Oil 100-Ton Truck Using Taguchi Method at Coal Mining Company*.
- [4] Violino, B. (2020). IoT and AI boost Volvo Trucks vehicle connectivity. *Network World*. <https://www.networkworld.com/article/3587404/volvotrucks-boosts-vehicle-connectivity-with-ai-and-iot.html>.
- [5] Caguana Quilumbaquí, J. E. (2019). La gestión de activos fijos en la empresa manufacturas de cuero Calzafer Cía. Ltda (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Contabilidad y Auditoría. Carrera Contabilidad y Auditoría).
- [6] Plata Navas, S. (2021) Uso de la tecnología como herramienta integradora en la gestión de activos de una organización del sector hidrocarburos.
- [7] Chávez Liquinchana, Á. O. (2020). Análisis del uso de herramientas informáticas para la gestión de activos empresariales en las empresas del sector alimenticio registradas en la Cámara de la Pequeña y Mediana Empresa de Pichincha (Master's thesis, Quito, EC: Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador).
- [8] Baylón Caballero, J. L. (2020). Incidencia de la trazabilidad en la gestión de activos fijos de la Empresa Tecnológica de Alimentos SA.
- [9] Satama Ramírez, H. I., & Vélez Calderón, F. C. (2018). *Propuesta para la gestión integral de activos físicos dentro del área de mantenimiento vehicular dirigido al Benemérito Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Cuenca* (Bachelor's thesis).
- [10] Amendola, L., & Depool, T. (2020). ABC de la Gestión de Activos. Madrid: Ediciones PMM Institute for Learning.
- [11] Norma Norsok Standard Z-008. (2011). *Risk based maintenance and consequence classification*.
- [12] Ren, Z., Verma, A. S., Li, Y., Teuwen, J. J., & Jiang, Z. (2021). Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110886.
- [13] Carbo Mora, C. R. (2019). La gestión de activos como herramienta para la toma de decisiones de inversión en la compañía concesionaria del Aeropuerto de Guayaquil.
- [14] Caqui Alejandro, N. A. (2021). Control de activos fijos y su incidencia en la gestión financiera de la empresa Transportes Pomacocha SAC, en la Provincia Constitucional del Callao-2019.
- [15] Parra, D., Rosario, E., González, E., & Zabala, M. (2020). Sistema de gestión tecnológica para unidades productivas integradas. La Tecnología y su huella en las Áreas del quehacer humano. *REVECITEC*, 10(1), 114-126.
- [16] Baylón Caballero, J. L. (2020). Incidencia de la trazabilidad en la gestión de activos fijos de la Empresa Tecnológica de Alimentos SA, 2019.
- [17] Paco, J. A., Montañó, M. F. R., & Ruíz, J. M. E. (2021). CAPÍTULO 3 LA GESTIÓN DE ACTIVOS Y RECURSOS INTANGIBLES EN LAS PYMES INDUSTRIALES. *Estrategias y competitividad en la era digital*, 579.
- [18] Ahumada, F. G. (2018). Alineamiento entre costes de Ciclo de Vida: estrategias de Mantenimiento y Gestión de Activos. *Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios*, (318), 27-35.
- [19] Galindo Vargas, A. C. (2020). *Implementación de la norma ISO 55001 en ISA Intercolombia y su impacto en la transformación cultural de la organización* (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).
- [20] Nuñez Velarde, K. G., & Pacheco Chávez, P. G. (2021). Optimización del proceso de gestión de flota para una empresa de transporte de carga por carretera usando Machine Learning, BI, GPS y SMS Gateway.

Diseño de sistema para la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil para robótica de enjambres

Design of a deposition system for a ferromagnetic pheromone from a mobile robot for swarm robotics

Daniel Monge-Chaves¹, Juan Carlos Brenes-Torres², Cindy Calderón-Arce³

Fecha de recepción: 20 de abril, 2023
Fecha de aprobación: 21 de setiembre, 2023

Monge-Chaves, D; Brenes-Torres, J.C; Calderón-Arce, C.
Diseño de sistema para la deposición de una feromona ferromagnética desde un robot móvil para robótica de enjambres.
Tecnología en Marcha. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 109-120.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6704>

- 1 Ingeniero en Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: daniel.monge@estudiantec.cr
- 2 Escuela de Ingeniería en Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Estudiante Doctorado en Automática, Robótica e Informática Industrial. Universidad Politécnica de Valencia, España
Correo electrónico: juanbrenes@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6323-2173>
- 3 Escuela de Matemática, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: ccalderon@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0077-225X>

Palabras clave

Feromona; estigmergia; ferrofluido; robótica de enjambres; Robotino.

Resumen

En este artículo se muestra el diseño, la implementación y validación de un sistema de deposición de una feromona ferromagnética. El trabajo surge de la necesidad de implementar un método de comunicación bio inspirado, como lo son las feromonas, en un enjambre de robots móviles. Esto para lograr un comportamiento colectivo coordinado por medio de la interacción entre diversos robots. El sistema diseñado logra la deposición de gotas de feromona de 6mm de diámetro con un error del 1.5% y con un tiempo de magnetización de hasta 30 minutos, a través de un robot denominado Robotino.

Keywords

Pheromone; stigmergy; ferrofluid; swarm robotics; Robotino.

Abstract

This paper presents the design, implementation, and validation of a deposition system for a ferromagnetic pheromone. The project originates from the necessity of a bio-inspired communication method, like pheromones, on a swarm of mobile robots. This was desired to achieve a collective behavior due to the interaction of several robots. The designed system was able to deposit pheromone drops of 6mm in diameter, with a 1.5% error and a magnetization time of 30 minutes, by using a Robotino robot.

Introducción

Con el objetivo de crear e implementar sistemas para planificar y obtener rutas óptimas en escenarios estáticos y dinámicos, se han desarrollado proyectos que buscan contribuir con el acceso y/o evacuación en situaciones de desastre, como lo son los derrumbes o incendios. Tal es el caso de la secuencia de proyectos denominada PROE (Planificación de rutas por medio de enjambres de robots) la cual procura la utilización de comportamientos colectivos y coordinados por medio de la interacción entre varios robots [1].

La comunicación entre robots puede ser llevada a cabo de forma directa o indirecta. La comunicación directa es aquella en la cual la transmisión y recepción de datos se da en intervalos tan cortos que se consideran simultáneos. Este tipo de comunicación requiere de una base central que se encargue de coordinar los mensajes, lo cual va en contra del objetivo de comunicación descentralizada que se busca mediante los enjambres robóticos [2].

Por su parte, la comunicación indirecta es aquella en que el envío y la recepción del mensaje se dan en instantes distintos. Como parte de los mecanismos de comunicación indirecta empleados en la robótica de enjambres, con base en fenómenos de la naturaleza, se encuentra el fenómeno de las feromonas [3]. En la robótica de enjambres el uso de feromonas permite a los elementos robóticos conocer cuándo un robot o elemento móvil transitó la zona que se está recorriendo. De este modo, se logra una comunicación indirecta entre los distintos elementos que componen el sistema robótico para obtener un nivel de coordinación entre estos y así lograr tareas como la de optimización y planificación de rutas. Este mecanismo se ha considerado como el nominal en robótica de enjambres, pues es consistente con el objetivo de comunicación

descentralizada que buscan dichos sistemas y permite la transmisión de información de un elemento a otro del enjambre, pero con diferencias temporales entre el momento de recepción y de envío del mensaje [2].

En ese sentido, Brenes-Torres et al. [4] proponen la utilización de una sustancia ferromagnética fácilmente dispensable, medible con sensores de fácil acceso y bajo costo, amigable con el medio ambiente y que además cumple con las características de localidad, difusión y evaporación buscadas en una feromona. Dicha sustancia no ha sido implementada en sistemas robóticos reales, por lo que este trabajo pretende dar a conocer los resultados de la implementación de la feromona ferromagnética en un robot denominado Robotino, así como el diseño y la adaptación de sistema de deposición de la feromona.

Estado del arte

Robotino es una plataforma robótica móvil de la marca alemana Festo, desarrollada para la investigación y la educación, ver Figura 1. Con un accionamiento omnidireccional, sensores, interfaces y extensiones específicas para aplicaciones. Robotino puede utilizarse, en aplicaciones individuales, de forma muy flexible por medio de lenguajes y sistemas de programación disponibles en la comunidad científica. El accionamiento omnidireccional permite que el Robotino se mueva holonómicamente en el plano [5].



Figura 1. Robot móvil Robotino de Festo.

Por otro lado, la inteligencia de enjambres se refiere al sofisticado comportamiento colectivo que puede surgir de la combinación de muchos individuos simples, cada uno operando de forma autónoma. En la robótica este tipo de inteligencias se conoce como *robótica de enjambres*, la cual es un nuevo enfoque para la coordinación de gran número de robots relativamente sencillos, autónomos, no controlados de forma centralizada, capaces de tener comunicación local y que operan con un cierto sentido de inspiración biológica [6,7].

Cuando una tarea requiere de cooperación entre robots o agentes es necesario que se dé una comunicación entre los elementos que la van a llevar a cabo. La comunicación implícita es uno de los métodos de comunicación a través del entorno. Las feromonas son un tipo implícito de dicha comunicación. Un nivel superior de feromonas llamado “feromona virtual” se ha introducido en

distintos trabajos emulando la comunicación y realizando coordinaciones sencillas para lograr resultados a gran escala en las áreas de vigilancia, reconocimiento, detección de peligros y búsqueda de rutas [8]. Por su parte, la comunicación explícita es el tipo de comunicación en la que los robots se transmiten directamente mensajes entre sí y/o al operador humano [9].

Las feromonas son uno de los medios de comunicación más efectivos ampliamente utilizados por los animales [10]. Estos a menudo usan feromonas para transmitir señales que sirven para la organización social (reconocimiento de los miembros de una misma familia, parentesco o colonia), comportamiento territorial, búsqueda y elección de pareja, envío de mensajes de alarma y coordinación de comportamientos colectivos complejos. Un ejemplo típico de tal coordinación es el comportamiento de forrajeo de las hormigas, como el que se muestra en la Figura 2. Al llevar comida de una fuente al nido, las hormigas dejan un rastro de feromonas para indicar el camino a la comida. El olor de feromonas determina que las otras hormigas ajusten su comportamiento y sigan el rastro existente, reforzándolo, depositando feromona adicional a lo largo del camino, en un proceso auto catalítico [11].



Figura 2. Hormigas siguiendo un sendero por medio de feromonas.

Las feromonas en la naturaleza presentan tres características intrínsecas [2]: (i) Localidad: depende de las condiciones ambientales locales y además están en una posición estática dentro del espacio físico. (ii) Difusión: pueden difundirse formando un gradiente de su densidad. (iii) Evaporación: los niveles de concentración de la feromona deben decaer como una función del tiempo.

La implementación de las feromonas dentro de la robótica de enjambres ha sido tema de interés para múltiples investigaciones a lo largo del orbe. Salman et al. [12] presentan la implementación de un proyecto nombrado Phormica, en el cual el suelo del entorno fue recubierto previamente con una sustancia fotocromática de color blanco que cambia a magenta cuando se ilumina con luz UV. El color de la sustancia decae gradualmente hasta convertirse en blanco una vez retirada la luz UV.

Por otro lado, Fujisawa et al. [13] llevaron a cabo una implementación con vapor de etanol. La principal desventaja de este tipo de implementaciones consiste en que, debido al comportamiento turbulento propio de los gases, las mediciones de concentración son muy variables por lo que es difícil poder definir umbrales de concentración adecuados para la

detección. También, debido a las características propias del material, la evaporación de la sustancia se da de manera muy rápida por lo cual, el tiempo de efectividad de esta en el entorno es muy bajo.

Si bien se han llevado a cabo diversas implementaciones de feromonas en sistemas robóticos, no se ha encontrado evidencia de trabajos basados en feromonas para robótica de enjambres enfocados en la deposición de estas en ambientes no controlados, esto constituye el enfoque principal del presente trabajo. Este trabajo considera el diseño y la implementación de un sistema de bombeo hidráulico para la deposición de la feromona ferromagnética desde el robot móvil Robotino de Festo.

En los fluidos magnéticos el efecto neto del campo magnético adquirido por el ferrofluido no varía, a menos que la sustancia sufra algún tipo de movimiento mecánico que rompa la alineación de las partículas, por ejemplo, la agitación. En la feromona ferromagnética propuesta en [4], se implementó la agitación mediante un fenómeno amigable con el ambiente como lo es el proceso metabólico de la levadura ante la presencia de azúcar. Esta reacción provoca un aumento de volumen de la feromona debido a la creación de burbujas. Además, presenta un proceso de reacción que dura varios minutos, lo que coincide con el principio de evaporación buscado en la feromona.

Materiales y métodos

Feromona ferromagnética

Se propone la deposición de una feromona ferromagnética desde el robot móvil Robotino de Festo. La feromona utilizada es la propuesta por Brenes-Torres et al. en [4]. La composición de la feromona a utilizar se muestra en el Cuadro 1, donde se indica la composición de cada una de las dos sustancias que la conforman.

Cuadro 1. Composición de la feromona a utilizar.

Sustancia de la feromona	Material	Cantidad
Ferromagnética	Fe_3O_4	3 g
	Agua	4 mL
	Azúcar blanco	3g
Evaporación	Levadura seca	2g
	Agua	6 mL

Fuente: adaptado de [4].

Diseño del sistema de deposición

En el diseño del sistema se definieron como entradas la energía que lo alimentará, los materiales o dispositivos utilizados en el diseño del sistema de deposición y las señales de accionamiento manual por parte del usuario y de accionamiento automático por parte del Robotino. Y como salida del sistema el material, la feromona ya mezclada y magnetizada.

Se analizaron todas las posibilidades para cada componente del diseño, organizadas en energía, materiales y señales, se realizaron tres árboles de combinación que consideran todas las posibles combinaciones para el diseño del sistema de deposición. Luego, se procedió a

analizar cada una de ellas, descartando las menos promisorias. La selección del diseño final se organizó en dos etapas: la etapa de filtrado y la etapa de evaluación de conceptos. En la etapa de filtrado se elaboró una matriz de selección, se evaluaron y ordenaron todos los posibles conceptos por medio de una combinación y mejora de los mismos y finalmente se seleccionó uno o más conceptos.

Para el accionamiento por medio de señales manuales se seleccionó la conexión del botón directamente entre la alimentación y la bomba. En el accionamiento automático se definió por medio de la utilización de una señal digital proveniente del Robotino, seguida de una programación en el entorno *RobotinoView* de Festo y la utilización de un optoacople para acoplar el circuito digital con el circuito de potencia.

En la rama de materiales, la combinación de un envase de vidrio con tapa, una bomba peristáltica, un tubo de silicón, un conector “Y”, magnetos de neodimio (por su elevada concentración magnética entre los polos del imán) y una punta de goteo obtuvo la mejor evaluación respecto al resto de combinaciones, debido principalmente a la capacidad de control de parámetros, la capacidad de depositar gotas pequeñas, así como también su tamaño.

En el Cuadro 2 se muestra un resumen de los conceptos seleccionados para cada una de las ramas de la descomposición funcional definidas anteriormente

Cuadro 2. Resumen de conceptos ganadores.

Rama de descomposición funcional	Concepto ganador
Energía	Alimentación desde Robotino con interfaz de potencia
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> -Envase de vidrio con tapa en forma de tubo de ensayo, con volumen de 25 cm³, diámetro de 3 cm y una altura de 5 cm, -Bomba peristáltica modelo Intllab modelo RS385-635, con un motor de corriente directa de 12V y 3 W de potencia con dimensiones de 5.5 cm x 6.7 cm x 4.1 cm y un diámetro de la circunferencia de bombeo de 3 cm. -Tubo de silicón flexible de 2 mm diámetro en el interior 4 mm en el exterior. -Conector “Y” a base de polímeros. - Magnetos de neodimio de 10 mm de diámetro de 10 mm, 5mm de espesor de 5 mm, 2.9 mg de masa unitaria de 2.9 mg y 26.5 N de fuerza de atracción. -Punta de goteo a base de polímero y fabricada para tuberías de 2mm diámetro interno y realizan una disminución a un diámetro de 1mm.
Señales manuales	Botón, entre la alimentación y la bomba, de 9.5mm de diámetro, 27.5mm de largo, con una resistencia en contacto de 20mΩ, una vida útil de 50.000 ciclos y una capacidad de corriente de hasta 3 A
Señales automáticas	Señal digital proveniente del Robotino de 24 V, a prueba de cortos circuitos y con una corriente máxima de 1 A., seguida de una programación en el entorno Robotino View de Festo y la utilización de un optoacople para acoplar el circuito digital con el circuito de potencia, con una corriente de colector máxima de 50 mA

La etapa de magnetización considera la posición de los imanes colocados de forma que las líneas de campo laterales queden paralelas al movimiento de la sustancia. De lo contrario, el campo magnético se opondría al flujo del ferrofluido. También, se utilizaron placas de acero por encima y por debajo de los imanes, creando una etapa de magnetización enjaulada. La intensidad del campo magnético es significativamente menor fuera de las placas de acero. Esto minimiza el efecto de las líneas de campo superior e inferior de los imanes. Además, garantiza

que la alineación de las partículas en el ferrofluido se mantenga y evita el retorno del líquido. La manguera con la feromona pasa entre ambos magnetos, de modo que se magnetiza antes de su deposición (ver Figura 3).

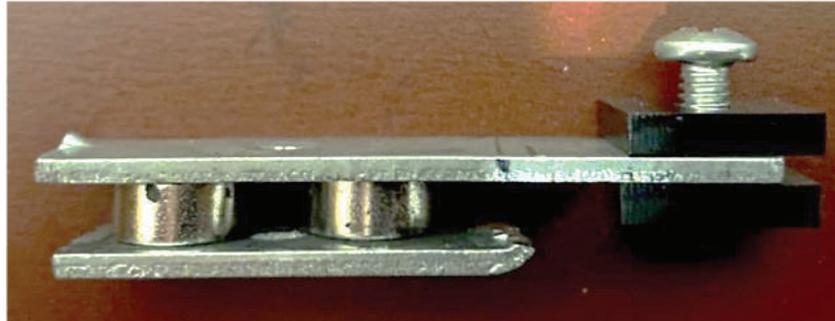


Figura 3. Estructuras de acero a utilizar en la etapa de magnetización después del maquinado.

La programación, para el trazado de la trayectoria, desarrollada en la herramienta *RobotinoView*, se describe en el diagrama de flujo de la Figura 4. Se implementó una trayectoria en forma de arco con rectas para la implementación de las pruebas. La longitud de las rectas y la distancia entre gotas son variables, son variables que define el usuario. Asimismo, la activación de la bomba se rige por un temporizador y la distancia entre gotas se define como una función de la velocidad del Robotino.

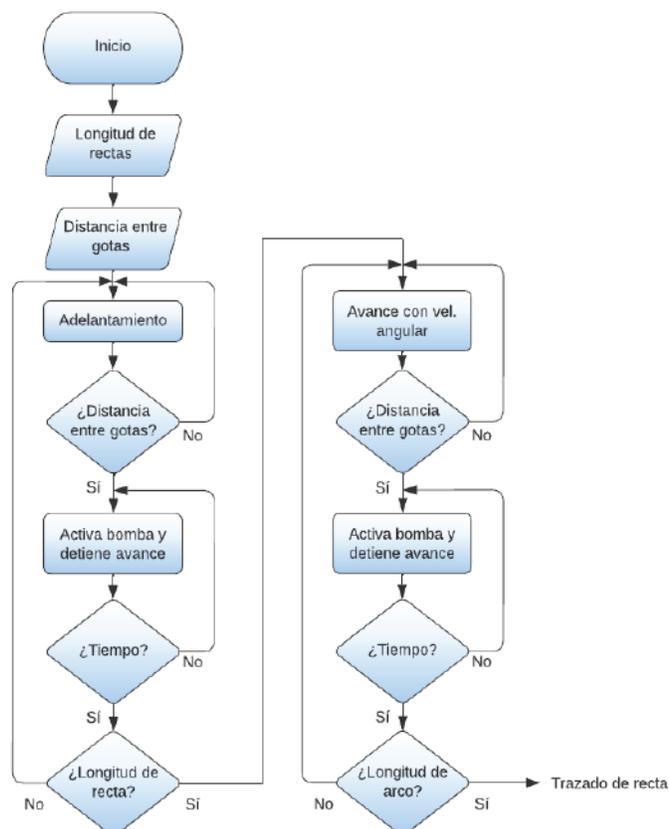


Figura 4. Diagrama de flujo de la programación implementada.

Se diseñó una carcasa de modo tal que se pudieran colocar: los envases, la placa perforada, el botón, el motor y la sección de deposición con las placas y los magnetos correspondientes, tal y como se muestra en la Figura 5. Dicha carcasa fue manufacturada en acrílico mediante el proceso de corte láser.

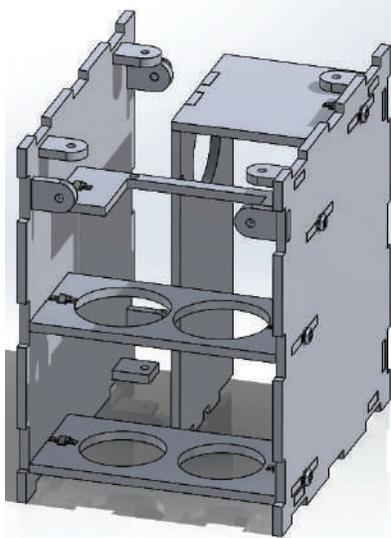


Figura 5. Carcasa solo con tapas laterales y piezas internas.

Finalmente, el sistema montado en el Robotino en conjunto con el programa descrito anteriormente permite realizar la trayectoria y la deposición mostradas en la Figura 6.

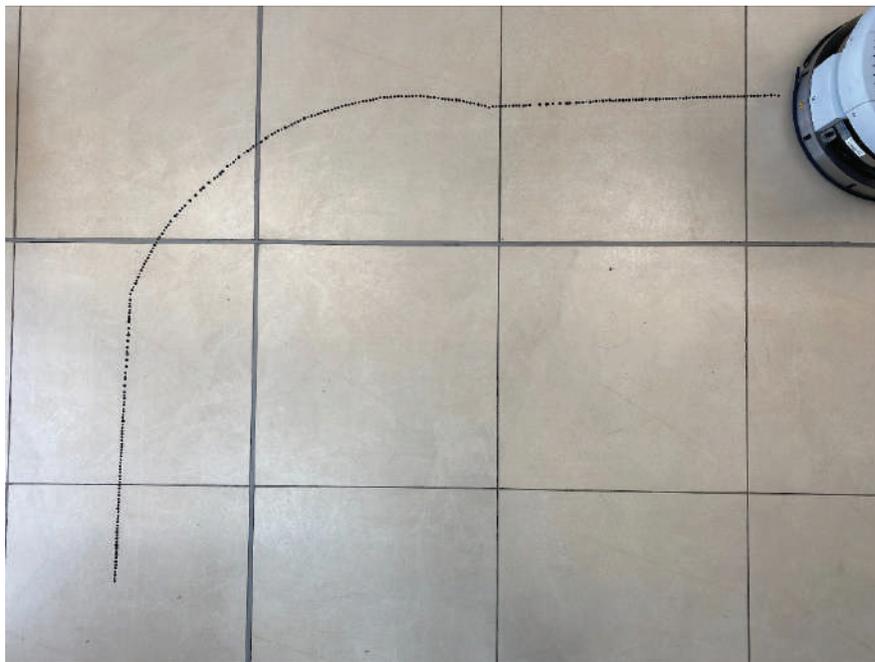


Figura 6. Trayectoria completa realizada por el robot Robotino con el sistema de feromona.

Resultados

Se procedió a realizar una serie de pruebas con distintos tiempos de activación de la bomba peristáltica para determinar el tiempo adecuado para obtener el valor de diámetro de la gota más cercano al valor objetivo de 6mm (Cuadro 3). Se tomaron 22 muestras para cada tiempo de deposición y se obtuvo que el tiempo de activación, que daba como promedio un valor más cercano al objetivo es el tiempo de activación de 2ms (Figura 7).

Cuadro 3. Diámetros de gota obtenidos en experimentos con distintos tiempos de activación de la bomba peristáltica.

Tiempo de activación (ms)	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variación	Porcentaje de error
4.0	6.18	0.98	15.89%	3.0%
3.5	6.14	0.52	8.40%	2.3%
2.0	6.09	0.55	9.00%	1.5%
1.0	9.11	1.53	16.83%	51.8%



Figura 7. Detalle de las mediciones de diámetro de gota para la muestra con tiempo de activación de 2ms.

Con respecto a la distancia entre gotas, para cada uno de los tiempos de activación, se consideraron 22 gotas depositadas (Cuadro 4). En todos los casos, en el programa se definió una distancia de 60mm entre gotas (Figura 8). Nuevamente el tiempo de deposición de 2ms presentó el porcentaje de error menor y el menor coeficiente de variabilidad.

Cuadro 4. Distancias entre gotas obtenidos en experimentos con distintos tiempos de activación de la bomba peristáltica.

Tiempo de activación (ms)	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variabilidad	Porcentaje de error
4.0	60.14	0.31	0.52%	0.24%
3.5	60.12	0.30	0.51%	0.19%
2.0	60.09	0.30	0.50%	0.16%
1.0	91.43	30.70	33.58%	52.38%



Figura 8. Ejemplo de la distancia entre gotas de feromona para un tiempo de deposición de 2ms.

La medición de magnetización se llevó a cabo utilizando un magnetómetro modelo CJMCU-008. Se recopilaron los datos de campo magnético en el eje Z desde un punto sobre la gota y otro punto alejado 60mm del centro de la gota, para un total de 12 gotas. Además, esto se realizó en distintos tiempos luego de la deposición (0 min, 10 min, 20 min y 30 min). En la gráfica de la Figura 9 se observan los resultados obtenidos para el valor del delta de magnitud de campo magnético. Se logra observar que la mayor variación en la magnitud del delta medido por el magnetómetro, ante la presencia de una gota de feromona, se da en los primeros 10 minutos. Seguidamente, la variación detectada por el magnetómetro sigue disminuyendo paulatinamente hasta que, a los 30 minutos de haber sido depositada, la sustancia prácticamente ya ha perdido casi todo su efecto magnético.

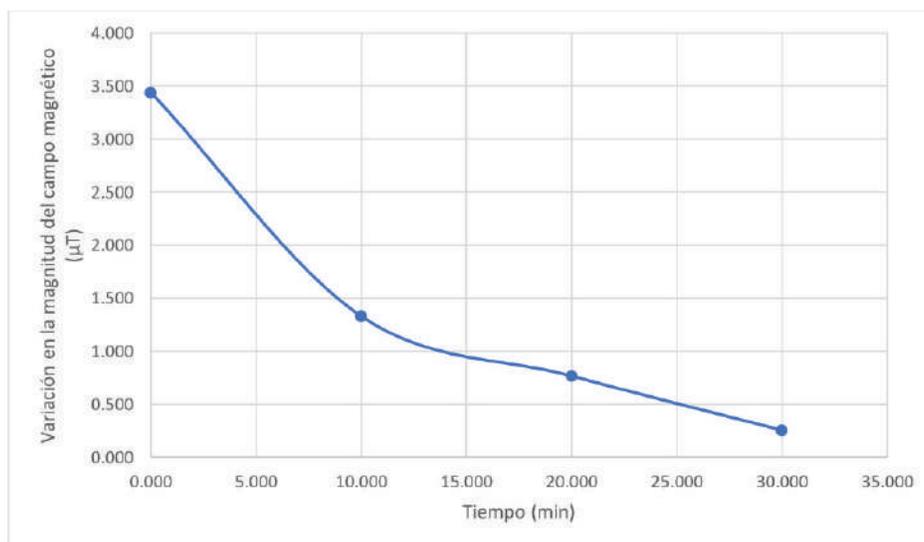


Figura 9. Gradiente de la variación de campo magnético ante la presencia de gotas de feromona en función del tiempo.

A partir de los datos presentados anteriormente, se logra validar la propiedad de magnetización esperada en la sustancia, y la difusión, observada por medio de un gradiente conforme se acerca el sensor a la gota. La propiedad de evaporación se observa mediante la reducción en función del tiempo de la variación de la magnitud del campo magnético al estar en presencia de una gota de feromona.

Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó e implementó un conjunto electromecánico capaz de llevar a cabo la deposición, mezcla y magnetización de una sustancia compuesta por una componente ferromagnética y otra componente de levadura hidratada.

Por medio del entorno RobotinoView se desarrolló un programa que permite la deposición de la feromona en la trayectoria deseada, con la posibilidad de que el usuario ingrese las longitudes de las rectas, así como también la distancia entre gotas.

Además, se determinó que el tiempo efectivo de magnetización de la gota es de aproximadamente 30 minutos, después de su deposición, y que el tiempo de activación de la bomba, para obtener una gota según los requerimientos deseados, es de 2 ms.

La bomba peristáltica, utilizada para el bombeo de la feromona, evita la contaminación cruzada entre el fluido a bombear y los elementos internos de la bomba, y además permite deponer volúmenes de fluido desde gotas hasta flujos continuos.

El conector, de acrílico, tipo “Y”, permite almacenar los dos componentes de la feromona por aparte y mediante una única bomba generar vacío en ambos envases y que el mezclado de las sustancias se dé de forma simultánea a la deposición de esta. Esto permite que la evaporación del efecto magnético de la gota producida por la fermentación comience hasta la deposición de la feromona y no mientras está almacenado.

Entre los aspectos de mejora y trabajos futuros se considera importante utilizar una bomba peristáltica de menor profundidad, pero con el mismo diámetro de rotor con el objetivo de disminuir las dimensiones del ensamble sin afectar la capacidad de deposición de gotas pequeñas. También reducir el tamaño del sistema mediante un posible reacomodo de los componentes que componen el ensamble electromecánico e implementar el circuito de control diseñado en una placa PCB. Por último, diseñar un elemento de fijación del ensamble electromecánico al robot en caso de que se desee utilizarlo en superficies irregulares y de poca planicidad, para evitar que el sistema se desplace o voltee debido a las vibraciones y saltos producidos por la superficie.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (VIE-ITCR), por su apoyo y soporte al proyecto denominado “Atta-Bots: Adaptaciones, comportamientos y funcionalidades en el marco de los proyectos PROE” (código 5402-1440-5101), estos resultados son parte de dicho proyecto. También se agradece al Área Académica Ingeniería Mecatrónica, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por permitirnos utilizar los robots Robotinos para este trabajo.

Referencias

- [1] C. Calderon-Arce y R. Solis-Ortega, “Swarm Robotics and Rapidly Exploring Random Graph Algorithms Applied to Environment Exploration and Path Planning,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 10, n.o 5, 2019. doi: 10.14569/IJACSA.2019.0100586.
- [2] R. Fujisawa, S. Dobata, K. Sugawara, et al. “Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance.” *Swarm Intelligence*, vol. 8, no. 3, pp. 227–246, Sep. 2014. Consultado: 11-Sep-2022. DOI: 10.1007/s11721-014-0097-z.
- [3] Heylighen, F. Stigmergy as a universal coordination mechanism I: Definition and components. *Cogn. Syst. Res.* 2016, 38, 4–13.
- [4] J.C. Brenes-Torres, F. Blanes, J. Simo, “. Magnetic Trails: A Novel Artificial Pheromone for Swarm Robotics in Outdoor Environments.” *Computation*, vol. 10, no. 6, Jun., pp. 98, 2022.

- [5] Karras, U. (2009). Robotino—an open learning mobile robot system for robocup.
- [6] M. Yogeswaran, S. G. Ponnambalam. (2010). An Extensive Review of Research in Swarm Robotics. Presentado en Nature & Biologically Inspired Computing, 2009. NaBIC 2009.
- [7] Calderón-Arce, C., Brenes-Torres, J. C., & Solis-Ortega, R. (2022). Swarm Robotics: Simulators, Platforms and Applications Review. *Computation*, 10(6), 80.
- [8] I. Navarro, F. Matía, “An Introduction to Swarm Robotics”, Hindawi Publishing Corporation, vol. 2013, no. 1, Ene. 2013. Consultado: 12-Sep-2022. DOI: 10.5402/2013/608164.
- [9] A. Hannawati, J. Iskandar y R. A. Russell. (2007), Pheromone Communication Simulation for Mobile Robots Using Java 3D. Presentado en Computer and Information Science, 2007. ICIS 2007. [En línea]. Disponible:
- [10] S. Camazine, J.L. Deneubourg, N.R. Franks, et al, *Self-organization in biological systems*. 1.ed, Princeton, Nueva Jersey, Estados Unidos de América: Princeton University Press, 2003.
- [11] I. Susnea, “A Brief History of Virtual Pheromones in Engineering applications”, American Journal of Engineering Research (AJER), vol. 5, no. 3, pp. 70-76, Mar. 2016. Consultado 11-Sep-22.
- [12] Salman, M., Garzón Ramos, D., Hasselmann, K., & Birattari, M. (2020). Phormica: Photochromic pheromone release and detection system for stigmergic coordination in robot swarms. *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 591402.
- [13] R. Fujisawa, H. Imamura, F. Matsuno. Cooperative transportation by swarm robots using pheromone communication. In *Distributed Autonomous Robotic Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2013; pp. 559–570.

Estimación del volumen pluvial captado por cubiertas usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): estudio de caso

Estimation of rainfall volume captured by roofs using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a case study

Oscar Abel Vergara-Leyes¹, Daner Jesús Julian-Vargas²,
Andrea Villarroel-Rocabado³, Javier Vicente Ruiz-Rivero⁴, Oscar
Mauricio Áviles-Jimenez⁵, Nahúm Gamalier Cayo-Chileno⁶

Fecha de recepción: 3 de mayo, 2023
Fecha de aprobación: 7 de octubre, 2023

Vergara-Leyes, O.A.; Julian-Vargas, D.J.; Villarroel-Rocabado, A.; Ruiz-Rivero, J.V.; Áviles-Jimenez, O.M.; Cayo-Chileno, N.G. Estimación del volumen pluvial captado por cubiertas usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT): estudio de caso. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 121-133.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6708>

- 1 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: overgaral@univalle.edu
 <https://orcid.org/0000-0003-4473-6688>
- 2 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: jvd0029656@est.univalle.edu
 <https://orcid.org/0009-0006-9626-7499>
- 3 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: vra5001469@est.univalle.edu
 <https://orcid.org/0009-0001-1543-7585>
- 4 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: rj0026867@est.univalle.edu
 <https://orcid.org/0000-0003-2714-6774>
- 5 Universidad Privada del Valle. Bolivia.
Correo electrónico: oavilesj@univalle.edu
 <https://orcid.org/0000-0003-3182-1015>
- 6 Universidade Federal de Lavras. Brasil.
Correo electrónico: nahum.cayo.chileno@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4350-1174>

Palabras clave

Almacenamiento de agua; control automático; precipitación; procesamiento de datos; techo; UAV.

Resumen

En los últimos años, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) han presentado una variedad de aplicaciones. Estudios recientes demuestran sus ventajas al momento de cuantificar áreas para la estimación de escorrentía pluvial. Sin embargo, existen incertidumbres sobre su alcance real. Ante ello, el objetivo del estudio es estimar el volumen pluvial captado por cubiertas mediante VANT. La metodología consistió en seleccionar una zona de estudio compuesta por una variedad de cubiertas, en el que las áreas fueron medidas digitalmente, esta última por medio del procesamiento de imágenes captadas por VANT. Para el cálculo de volumen de escurrimiento, se tomaron los datos de precipitación media mensual de los últimos 11 años, y se consideraron los Coeficientes de Escorrentía (C_e) reportados en la literatura. A continuación, se calculó el volumen de escurrimiento medio mensual para cada cubierta. Los resultados muestran que las cubiertas estudiadas (Coliseo - Biblioteca), tienen la capacidad de captar un volumen anual de 2237.75 m³. Con un volumen promedio de 406.74 m³ durante la época lluviosa (noviembre a marzo) y 29.15 m³ en la época seca (abril a octubre). Aunque el uso de VANT permite determinar uno de los valores dentro del cálculo de volumen de escorrentía, para lograr un resultado más exacto, es preciso analizar y evaluar las otras variables (C_e y precipitación).

Keywords

Automatic control; data processing; precipitation; roof; UAV; water storage.

Abstract

In recent years, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have presented a variety of applications. Recent studies show their advantages when quantifying areas for storm runoff estimation. However, there are uncertainties about their actual range. Therefore, the objective of this study was to estimate the volume of rainfall captured by roofs using UAVs. The methodology consisted of selecting a study area composed of a variety of canopies, in which the areas were digitally measured, the latter by processing images captured by UAV. For the calculation of runoff volume, the average monthly precipitation data of the last 11 years were taken, and the Runoff Coefficients (C_e) reported in the literature were considered. Then, the mean monthly runoff volume was calculated for each canopy. The results show that the roofs studied (Coliseum - Library) have the capacity to capture an annual volume of 2237.75 m³. With an average volume of 406.74 m³ during the rainy season (November to March) and 29.15 m³ during the dry season (April to October). Although the use of UAV allows determining one of the values within the runoff volume calculation, in order to achieve a more accurate result, it is necessary to analyze and evaluate the other variables (C_e and precipitation).

Introducción

La importancia del uso del agua deriva en el sustento de los sectores sociales y económicos, ya que se presenta como la base fundamental de los recursos naturales, de los cuales depende el mundo [1]; sin embargo, debido a la sobreexplotación y a los efectos del cambio climático, este recurso se considera en estado de estrés hídrico crítico [2]–[4]. Debido a ello, se desarrollan

prácticas para el correcto aprovechamiento del agua, como es el caso de la colecta del agua pluvial [5], la cual resulta como alternativa viable incluso para zonas urbanas [6], ya que su adecuado almacenamiento permite su utilización en actividades del día a día (trabajos de limpieza, lavado de autos, recarga de inodoros, etc.) [7].

Esta idea es sostenida por estudios realizados en espacios institucionales, como es el caso de la Universidad del Valle sede Meléndez, Colombia [8], Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia [9], Universidad Peruana los Andes [10], entre otras, que demuestran una relación entre el aprovechamiento hídrico y los sistemas de captación de agua de lluvia, particularmente, cubiertas. Debido a que las instituciones cuentan con los planos de las infraestructuras, la estimación del volumen pluvial no representa un factor de gran complejidad. Sin embargo, la carencia de estos datos implica la búsqueda y evaluación de métodos que permitan su obtención, sin que estos involucren un alto costo de inversión.

Tradicionalmente la toma de dimensiones de infraestructuras civiles es realizada por medio de instrumentos topográficos [11]. Este trabajo conlleva un mayor tiempo y costo de operación [12] en relación con las nuevas tecnologías emergentes. Tal es el caso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), los cuales se caracterizan por ingresar a lugares de difícil acceso para el ser humano [13], [14]. Entre otras ventajas, Inzerillo et al. [15] y Romero-Chambi et al. [16], resaltan la rápida adquisición de datos, información de la superficie estudiada e imágenes de alta calidad. Además, mediante el procesamiento de datos obtenidos por medio de un plan de vuelo en condiciones favorables (altura, horario, velocidad de vuelo, entre otros), es posible lograr mediciones adecuadas al área de estudio [17], [18].

No obstante, muchas de estas ventajas están limitadas a las características técnicas del VANT. En investigaciones pasadas se puede observar que la estimación del volumen pluvial es alcanzada desde levantamientos fotogramétricos [19] hasta análisis multiespectrales [20]. A pesar de ello, aún existe la incertidumbre sobre la aplicabilidad práctica de estos equipos, siendo un tema actualmente estudiado en la Ingeniería Civil. Por tal motivo, el objetivo del artículo es estimar el volumen pluvial captado por cubiertas, mediante el levantamiento fotogramétrico realizado con VANT dentro de la Universidad Privada del Valle.

Metodología

Para alcanzar el objetivo de la presente investigación, se plantearon 3 etapas. En la primera se llevó a cabo la selección y descripción del área de estudio. La segunda etapa comprendió la recolección de datos digitales por medio de VANT, mismas que fueron procesadas a través de la secuencia de pasos que deriva en añadir las imágenes tomadas, alinearlas, construir la nube de puntos, generar el modelo en mosaico, modelo digital de elevación y, finalmente, el ortomosaico. Paralelamente, se descargaron los datos de precipitación de la estación meteorológica más próxima. Por último, en la tercera se realizó el cálculo de coeficientes de escurrimiento y volumen pluvial captado.

Fase I

Descripción del área de estudio

El área de estudio identificado pertenece a la Universidad Privada del Valle, la cual se ubica en la ciudad de Tiquipaya-Cochabamba, Bolivia (Figura 1). Esta es seleccionada por presentar una variedad de cubiertas estructurales, además de contar con los permisos solicitados por la Dirección General de Aeronáutica Civil [21], al momento de operar un plan de vuelo con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs).



Figura 1. Ubicación de las cubiertas estudiadas.

Fase II

Adquisición y análisis de datos

La toma de datos digitales fue realizada con el VANT Phantom 4 Pro de la marca DJI, cuyas características técnicas se presentan en el Cuadro 1, equipo utilizado en numerosas investigaciones por las ventajas que este presenta al momento de operar y configurar un plan de vuelo [22], [23].

Cuadro 1. Características del Phantom 4PRO.

Especificaciones	DJI Phantom 4 Pro
Peso	1388 g
Tiempo máximo de vuelo	Aproximadamente 30 min (por batería)
Capacidad de visión del sistema	Delantera
	Trasera
	Hacia abajo
Sensores de detección de obstáculos	Delantera
	Trasera
	Derecha
	Izquierda
Sensores de cámara de 1" CMOS con píxeles efectivos	20 M
Resolución máxima de video	4K 60P

La toma de imágenes fue realizada con el programa DroneDeploy, para lo que se utilizó la versión libre, la cual permite generar vuelos remotos horizontales, calcular el tiempo y la ruta de vuelo del área seleccionada. Los parámetros de vuelo fueron configurados en base a valores identificados en la literatura: superposición longitudinal y transversal (75%), altura de vuelo (40 m) y velocidad de vuelo (3 m/s) [25], [17]. Adicionalmente, se desactivaron las opciones Live Map HD y 3D Mejorado, ya que el resultado esperado es un ortomosaico con vista de planta.

Para cubrir el área seleccionada se empleó un total de 3 baterías. El plan de vuelo fue realizado en el rango de las 11:00 a 13:00 horas, el cual es reportado por Rocha et al. [17], Ruiz et al. [26] y Fernández-Dávalos et al. [27] como periodo recomendado para la toma de imágenes. Posteriormente, las imágenes tomadas fueron procesadas por medio del software Pix4D Mapper Enterprise, programa empleado en distintas investigaciones al momento de generar una alineación de imágenes, reconstrucción del Modelo Digital de Elevación (DEM) y generación del ortomosaico [22], [23].

A continuación, se realizó la selección aleatoria de 2 cubiertas, viendo de que estas presenten una diferencia en el material usado (teja/calamina). Para tomar las dimensiones, se optó por usar el software Global Mapper V18, el cual por medio de la herramienta create feature, permite obtener los valores de perímetro y área del polígono dibujado (Figura 2).

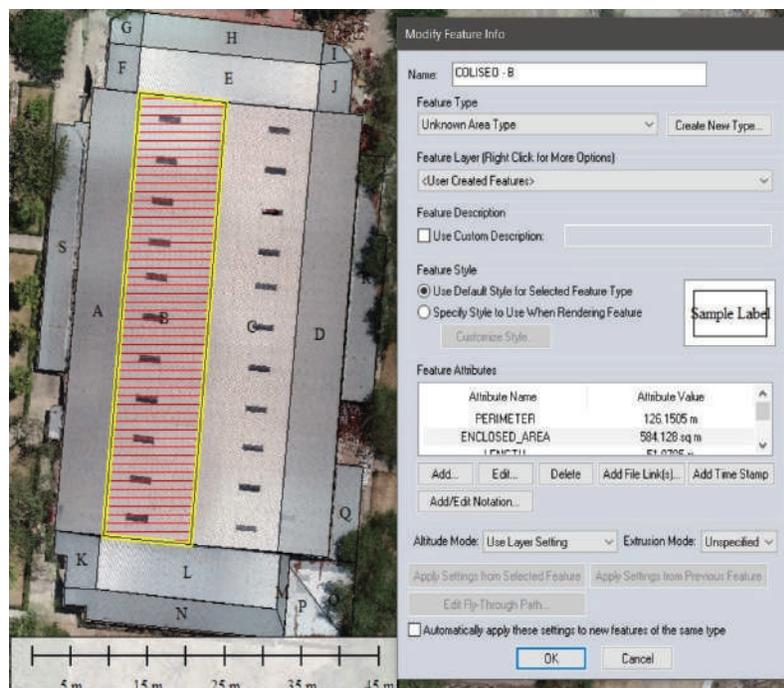


Figura 2. Medición de área de cubierta.

Recolección de datos de precipitación

Para el presente estudio se consideraron los datos de precipitación media mensual de los últimos 11 años (1 de enero de 2012 al 31 de diciembre del 2022). Si bien la institución cuenta con una estación meteorológica automática, esta entra en funcionamiento regular a partir del 1 de agosto del 2022, por lo que la información recolectada es insuficiente. Debido a ello, se opta por usar los datos de la estación meteorológica más próxima al área de estudio, la cual corresponde a “La Violeta”, ubicada a una distancia menor a los 3 km. La información de la estación es presentada en el Cuadro 2, mientras que los datos fueron extraídos de SENAMHI [28].

Cuadro 2. Datos de la estación meteorológica La Violeta.

Descripción	Datos generales
Latitud	-17.347222
Longitud	-66.231667
Altura	2614 msnm
Fecha inicio de operación	31 de Dic de 1978
Fecha fin de operación	Activo

Fuente: Modificado en base a SENAMHI [29]

Fase III

Cálculo del volumen de escurrimiento

Dentro del cálculo del volumen de escurrimiento, es prudente considerar el valor de precipitación, área de la superficie y particularmente el coeficiente de escurrimiento (C_e), siendo este último la propiedad superficial característica de los materiales.

Coefficiente de escurrimiento

Martínez de Azagra – Paredes [30], señala que los valores del C_e varían dentro del rango de 0 a 1 cuando el valor es 1 todo lo que precipita escurre y, si el valor será 0, todo lo precipitado es retenido. Para su cálculo se empleó la Ecuación (1) propuesta por Monsalve Sáenz [31].

$$C_e = \frac{E}{P} \quad (1)$$

Donde:

C_e = Coeficiente de escurrimiento, adimensional 0 a 1.

E = Escurrimiento expresado en lámina, mm.

P = Precipitación, mm.

Por otra parte, numerosas investigaciones ya proporcionan una aproximación del valor de C_e en relación con el material, por lo que en el presente estudio se considera 0.8~0.9 (teja) y 0.9 (metal) [32]–[34].

Volumen de escurrimiento

Para el cálculo del volumen de escurrimiento se empleó la Ecuación (2) [35].

$$V_{jk} = C_e * A_{Total} * P_m \quad (2)$$

Donde:

V_{jk} = Volumen medio mensual potencial a captar, m³.

C_e = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional.

A_{Total} = Área total de captación, m².

P_m = Precipitación media mensual, m.

Resultados y discusiones

Áreas de escurrimiento

En la Figura 3, se presentan las cubiertas seleccionadas, mismas que fueron divididas en secciones para asegurar la exactitud del área (Cuadro 3). Debido a la falta de personal capacitado, no se realizó una medición In Situ; sin embargo, investigaciones previas demuestran la viabilidad al momento de cuantificar los valores del área estudiada, Fernández-Dávalos et al. [27] identifican errores en el rango de 2.75% al 9% para un plan de vuelo a 40 m, mientras que, Rocha et. al. [17] presenta resultados con un error promedio de 1.42%, bajo condiciones ideales de vuelo (altura de vuelo 20m, horario de vuelo entre las 10 y 12hrs) y, Lima et al. [12] reporta un error del 0.71% (altura de vuelo 50 metros, con puntos de control). La variación es reportada en la literatura, ya que en muchas ocasiones esta es generada a causa de las características del sitio a evaluar [36].

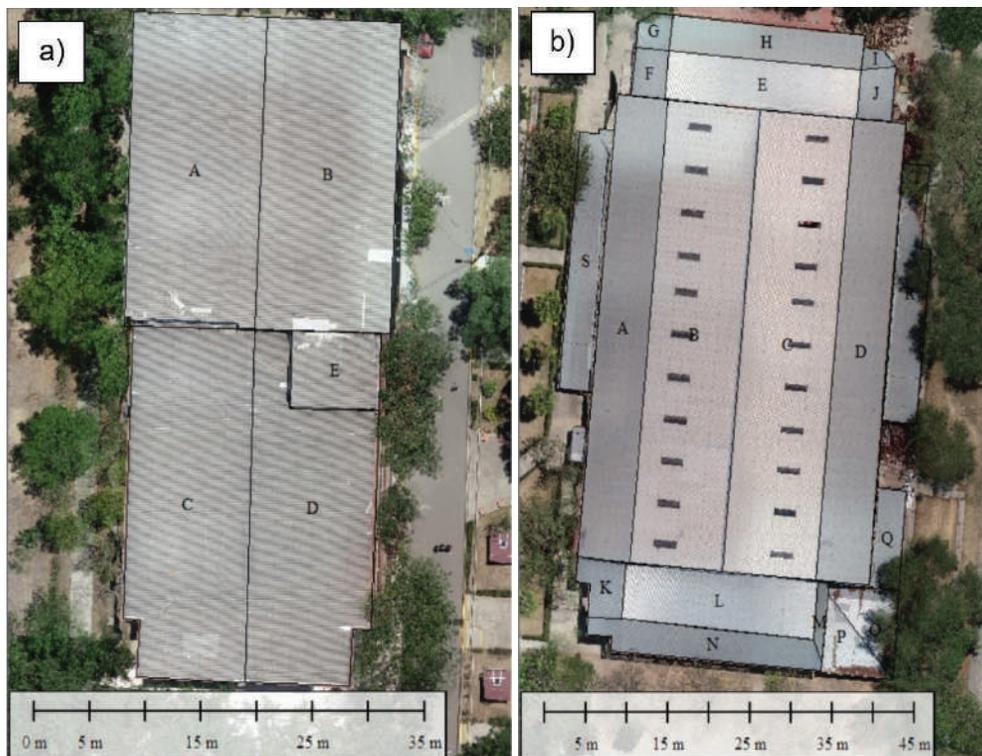


Figura 3. Vista aérea de Cubiertas seleccionadas a) Biblioteca y b) Coliseo.

Cuadro 3. Áreas de escurrimiento.

Cubierta	Material	Sección	Área (m ²)	Sumatoria (m ²)
Biblioteca	Teja	A	327.13	1321.07
		B	328.20	
		C	330.05	
		D	283.78	
		E	51.91	
Coliseo	Calamina	A	323.62	2773.85
		B	584.13	
		C	590.49	
		D	333.69	
		E	128.73	
		F	22.34	
		G	15.51	
		H	93.61	
		I	6.99	
		J	24.39	
		K	31.20	
		L	151.94	
		M	9.81	
		N	96.51	
		O	49.18	
P	38.37			
Q	40.62			
R	112.34			
S	120.38			

Precipitación media mensual

En la Figura 4 se presenta el promedio de la precipitación mensual en el periodo de 11 años. Siendo este valor para la época lluviosa (noviembre a marzo) de 114.47 mm y para la época seca (abril a octubre) de 8.20 mm. Mientras que, la precipitación promedio por año es de 52.50 mm.

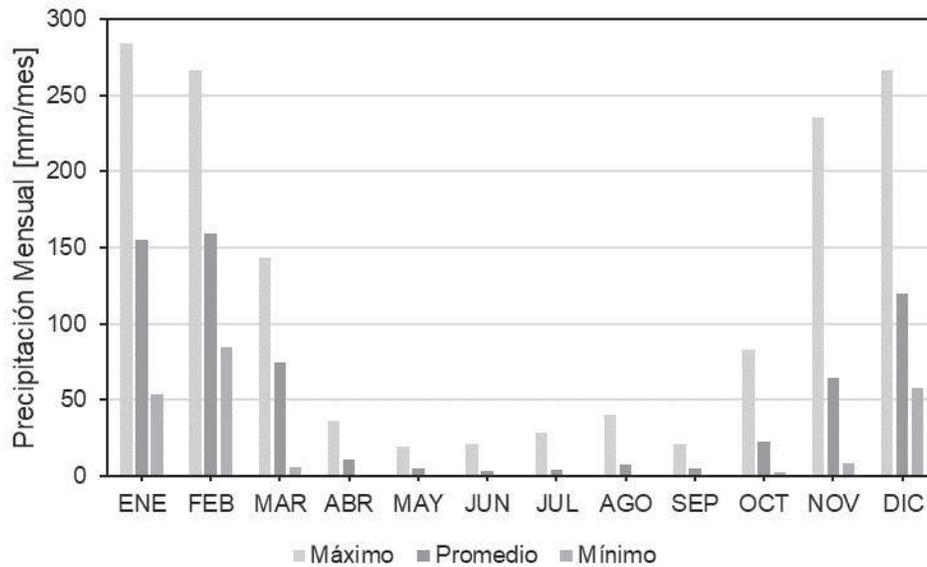


Figura 4. Precipitación promedio mensual.

La literatura recomienda trabajar con el valor promedio mensual [8], [9]. Sin embargo, Ruiz Mendoza [10], indica que es de importancia considerar a los valores máximos históricos para lograr un óptimo diseño estructural (tanque). En el presente estudio, los valores históricos corresponden al mes de enero del año 2014 con una precipitación total de 284.20 mm, mientras que, el total anual corresponde al año 2018, con una precipitación de 940 mm. Debido a que la finalidad del estudio es cuantificar el volumen de escurrimiento captado por cubiertas, por medio de VANT, el trabajo se limitó a realizar el análisis de periodos de retorno, puesto que, no se pretende lograr un diseño de tanque estructural.

Por otra parte, Aksu y Akgül [37] señalan que la información meteorológica es deficiente en muchas zonas del mundo. Por lo que, Toté et al. [38] y Dinku et al. [39] consideran a los datos captados por satélites como una alternativa; sin embargo, debido al gran número de proveedores, es necesario realizar un proceso multicriterio para seleccionar al más apropiado. La investigación desarrollada por Le Noir et al. [40], indica que el producto satelital CHIRPS (resolución 4.8 km) resulta en la mejor opción al momento de requerir datos de precipitación para la ciudad de Tiquipaya-Cochabamba, Bolivia. A pesar de ello, el área de estudio del presente trabajo cuenta con una estación meteorológica física a una distancia no mayor a los 3 km, motivo por el cual se desconsideraron los datos satelitales.

Volumen de escurrimiento medio mensual

En la Figura 5, se pueden observar los valores del volumen de escurrimiento medio mensual. Durante la época lluviosa (noviembre a marzo), las cubiertas del Coliseo (metal) y la Biblioteca (teja), captaron un volumen promedio de 285.76 m³ y 120.98 m³, mientras que en la época seca (abril a octubre), los valores son de 20.48 m³ y 8.67 m³, respectivamente.

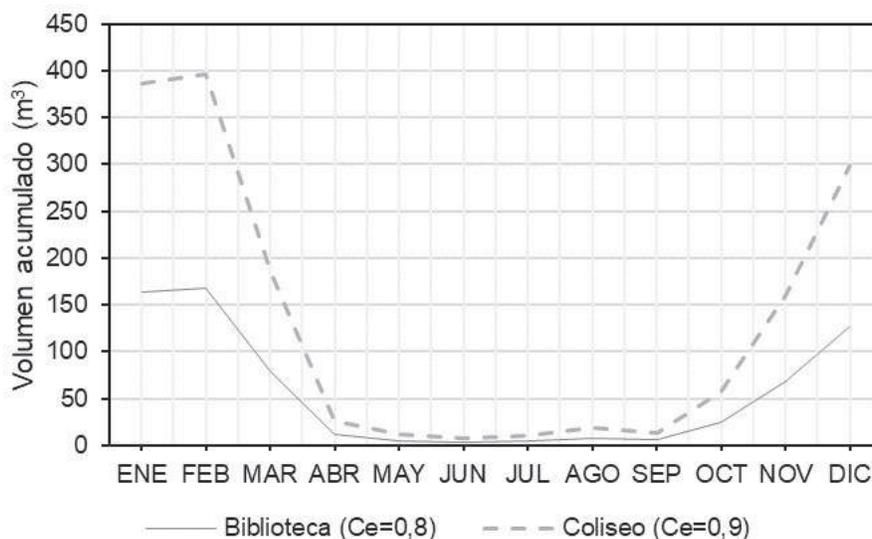


Figura 5. Volumen de escurrimiento medio mensual.

Bajo los valores de precipitación media mensual, se puede señalar que, durante toda una gestión anual la cubierta del Coliseo (con $C_e=0.9$) puede captar un volumen total de 1572.18 m³; mientras que, la Biblioteca (con $C_e=0.8$) escurre un total de 665.57 m³. Sin embargo, este último valor llega a ser variable, ya que la literatura reporta una variación del C_e (para la teja) entre 0.8~0.9. Si el valor es calculado con un $C_e=0.9$, la diferencia es de 83.20 m³, es decir, este escurre 62.98 litros de más por metro cuadrado. Ante lo observado, es recomendable determinar el C_e del material por medio de la ecuación presentada por Monsalve Sáenz [31], de esta manera, el cálculo del volumen de escurrimiento será más preciso.

No obstante, Rojas Marmolejo [35] indica que existen otros factores que llegan afectar al cálculo de escurrimiento, como es el caso del grado de impermeabilización del material, intensidad de la lluvia y la pendiente de la superficie. Siendo este último de notable importancia, ya que el valor del área observada desde una imagen vista en planta, varía con relación al área real. El estudio realizado por Amisse et al. [41], demuestra la posibilidad de obtener el valor de áreas inclinadas con un error variable entre 0.21~0.60%, no obstante, para lograr el resultado reportado, se requiere generar un plan de vuelo con la opción 3D Mejorado.

En cuanto al valor anual, el volumen captado por la cubierta del Coliseo y la Biblioteca (con $C_e=0.8$), es de 2237.75 m³. Cifra que no puede ser considerada al momento de diseñar una estructura de almacenamiento. Por lo que, Henao Cárdenas y Castaño Arango [9], recomiendan realizar un diseño de reservorio para cada cubierta, analizando la oferta y demanda de agua solicitada por los servicios que brinda la infraestructura (lavamanos, inodoros, etc). Adicionalmente, la literatura reporta como estudio complementario el análisis físico químico del agua de lluvia. Aun cuando este no es potable, requiere cumplir con parámetros solicitados por diversas normas internacionales [42]–[44].

Conclusiones

El presente estudio de caso empleó un plan de vuelo con VANT para recopilar imágenes de alta resolución de un complejo de estructuras, que posteriormente fueron utilizadas para generar un ortomosaico de vista en planta. Con la ayuda del software GlobalMapper se logró cuantificar el

área de las cubiertas seleccionadas, cifra que en muchas investigaciones conlleva un mayor tiempo y costo de operación. Esta metodología demuestra la utilidad de los VANTs al momento de estimar el volumen de escorrentía captado por cubiertas.

En cuanto al Ce, se consideraron los valores reportados en la literatura; sin embargo, es recomendable realizar la determinación de este valor por medio del proceso experimental presentado por otros autores. Ya que, a través del análisis realizado en la cubierta de teja, se logró observar una diferencia de hasta 62.98 litros por metro cuadrado.

Con respecto al periodo de datos de precipitación, estos corresponden a los últimos 11 años de la estación meteorológica más cercana (La Violeta). No obstante, investigaciones previas señalan que, en el mundo, existen zonas que presentan una deficiencia en la cobertura en espacio y tiempo de datos meteorológicos. Por lo que, una alternativa resulta en la obtención de datos a través de satélites.

Si bien es posible identificar una variedad de usos para el agua de lluvia captada por cubiertas, es necesario realizar un análisis de las normativas que caracterizan sus propiedades fisicoquímicas. Por otra parte, si se considera el diseño estructural de un reservorio, es preciso contar con datos de la oferta y la demanda del agua solicitada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Valle y reconocen el apoyo recibido por parte de la Dirección Nacional de Investigación, Departamento de Ingeniería Civil, y el Departamento de Arquitectura y Urbanismo.

Referencias

- [1] UNESCO, "Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015," 2017. [En línea]. Available: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa
- [2] Y. Carvajal Escobar, "Tendencias en la formación en ingeniería del agua en América Latina," en *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, no 7, pp. 84-93, 2008.
- [3] R. D. Brenes Loria, R. E. Aguilar Álvarez, J. F. Aguilar Pereira, A. Torres Leitón, M. G. Blanco Barrientos, y D. Hernández Alvarado, "Implementación de sistema Automático de Monitoreo para Proyecto de Cosecha de Agua en Monteverde," *Ingeniería*, no 31, pp. 157-162, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/ri.v31i0.48008>
- [4] France24, "Naciones Unidas advierte del riesgo "inminente" de una crisis mundial de agua," 2023. [En línea]. Available: <https://www.france24.com/es/medio-ambiente/20230322-naciones-unidas-advierte-del-riesgo-inminente-de-una-crisis-mundial-de-agua>
- [5] E. Sánchez Almodóvar, J. Martí Talavera, y J. Olcina Cantos, "Buenas prácticas en el manejo y gestión del agua pluvial. Casos de estudio en la comarca del Bajo Segura," *cuadgeo*, vol. 61, no 1, pp. 229-250, 2022. doi: <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i1.21086>
- [6] R. Hofman-Caris, C. Bertelkamp, L. de Waal, T. Van den Brand, J. Hofman, R. Van Der Aa, y JP. Van Der Hoek, "Rainwater Harvesting for Drinking Water Production: A Sustainable and Cost-Effective Solution in The Netherlands?," *Water*, vol. 11, no 3, p. 511, 2019. doi: <https://doi.org/10.3390/w11030511>
- [7] B. Eren, A. Aygün, S. Likos, y A. İ. Damar, "Yağmur Suyu Hasadı: Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüs Örneği," 4th International Symp. on Innovative Technologies in Engineering and Science 3-5November 2016 (SITES2016 Alanya/Antalya - Turkey), 2016.
- [8] V. Feijoo Moreno y A. Perea Agredo, "Aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable en la Universidad del Valle sede Meléndez," Universidad del Valle sede Meléndez, Colombia, 2015.
- [9] J. L. Henao Cárdenas y Y. Castaño Arango, "Gestión ambiental universitaria a partir del aprovechamiento de agua pluvial. Caso de estudio," Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2016.
- [10] A. R. Ruiz Mendoza, "Aprovechamiento hídrico y sistema de captación de agua pluvial en techos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Peruana Los Andes–Huancayo," Universidad Peruana Los Andes–Huancayo, Perú, 2020.

- [11] B. Q. Fortunato, S. O. Antoun Netto, y L. V. Barbalho, "Levantamento topográfico do campus UERJ Maracanã para regularização patrimonial," *R. bras. Geom.*, vol. 7, no 2, p. 115, 2019. doi: 10.3895/rbgeo.v7n2.8827
- [12] G. O. Lima, M. C. O. Caldeira, y C. R. T. Caldeira, "Análise comparativa entre métodos de levantamento planialtimétrico para elaboração do plano diretor da comissão regional de obras em Belém – PA," *R. bras. Geom.*, vol. 8, no 4, p. 338, 2020. doi: 10.3895/rbgeo.v8n4.12307
- [13] A. G. Entrop y A. Vasenev, "Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures," *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 63-68, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.636>
- [14] R. R. S. de Melo, D. B. Costa, J. S. Álvares, y J. Irizarry, "Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites," *Safety Science*, vol. 98, pp. 174-185, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.008>
- [15] L. Inzerillo, G. Di Mino, y R. Roberts, "Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress," *Automation in Construction*, vol. 96, pp. 457-469, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.010>
- [16] E. Romero-Chambi, S. Villarroel-Quezada, E. Atencio, y F. Muñoz-La Rivera, "Analysis of Optimal Flight Parameters of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Detecting Potholes in Pavements," *Applied Sciences*, vol. 10, no 12, p. 4157, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/app10124157>
- [17] J. H. A. Rocha, N. G. C. Chileno, S. N. A. Rodriguez, A. I. A. Brañez, J. G. T. Camacho, y H. L. S. Miranda, "Pothole Identification in Flexible Pavement Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)," en Proceedings of the 6th Brazilian Technology Symp. (BTSym'20), Y. Iano, O. Saotome, G. Kemper, A. C. Mendes de Seixas, y G. Gomes de Oliveira, Eds., en Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 233. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 589-597. doi: 10.1007/978-3-030-75680-2_65.
- [18] R. Roblero, J. Flores, y Colegio de Postgraduados, "Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana," *VCS*, no 11, pp. 111-124, 2022, doi: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.197>
- [19] B. Silveira, R. Melo, y D. B. Costa, "Using UAS for Roofs Structure Inspections at Post-occupational Residential Buildings," en Proceedings of the 18th International Conf. on Computing in Civil and Building Engineering, E. Toledo Santos y S. Scheer, Eds., en Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 98. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 1055-1068. doi: 10.1007/978-3-030-51295-8_73
- [20] A. Yasin Yiğit y O. Orhan Ali Ulvi, "Investigation of The Rainwater Harvesting Potential at the Mersin University, Turkey," *Mersin Photogrammetry Journal*, vol. 2, no 2, pp. 64-75, 2020.
- [21] (DGAC) Dirección General de Aeronáutica Civil, "Boletín reglamentario: Regulación para el uso de aeronaves no tripuladas (RPAs)," 2023. [En línea]. Available: <https://www.dgac.gob.bo/drones/>
- [22] Y. Tan y Y. Li, "UAV Photogrammetry-Based 3D Road Distress Detection," *IJGI*, vol. 8, no 9, p. 409, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi8090409>
- [23] E. Ferrer-González, F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, y P. Martínez-Carricondo, "UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points," *Remote Sensing*, vol. 12, no 15, p. 2447, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- [24] DJI, "Phantom 4 Pro/Pro+ Manual del usuario V1.2," 2018. [En línea]. Available: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20170719/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_User_Manual_ES.pdf
- [25] A. M. Saad y K. N. Tahar, "Identification of rut and pothole by using multicopter unmanned aerial vehicle (UAV)," *Measurement*, vol. 137, pp. 647-654, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>
- [26] R. D. Ballesteros Ruiz, A. C. Lordsleem Júnior, y J. H. Aquino Rocha, "Inspeção de fachadas com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT): estudo exploratório," *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, vol. 11, no 1, pp. 88-104, 2021. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i1.517>
- [27] A. K. Fernández-Dávalos, C. L. Saavedra-Téllez, J. R. Muñoz-Pardo, J. P. Ramos-Machuca, N. G. Cayo-Chileno, y J. H. A. Rocha, "Análisis comparativo entre los programas Agisoft PhotoScan y Pix4Dmapper para la identificación de fallas en pavimento flexible usando Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs)," en Congreso Internacional sobre Patología e Reabilitação das Construções, Universidade Federal do Ceará, 2021, pp. 818-827. doi: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/CINPAR.2021.103>
- [28] (SENAMHI) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, "Información Nacional de Datos Hidrometeorológicos," 2023b. Available: <https://senamhi.gob.bo/index.php/sysparametros>
- [29] (SENAMHI) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, "Observatorio Nacional de Servicios Climáticos," 2023a. Available: <https://senamhi.gob.bo/index.php/onsc>

- [30] A. Martínez de Azagra-Paredes, "Particularización al método de los coeficientes de escorrentía," México, 2006.
- [31] G. Monsalve Sáenz, "Hidrología en la Ingeniería," Colombia, 1999.
- [32] G. Frasier y L. Myers, "Manual de recolección de agua – Manual de agricultura. Número 600. E.E.U.U: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos," 1983.
- [33] DIN, "Rainwater Harvesting Systems—Part 1: Planning, Installation, Operation and Maintenance," 1989.
- [34] J. E. Espinoza Correa, C. A. Solano de la Sala Monteros, F. L. Espinoza Urgilés, y F. G. Gonzaga Barreto, "Sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico en la Isla Jambelí, cantón Santa Rosa," *Cumbres* (En línea), vol. 3, no 1, pp. 151-159, 2017. doi: <https://doi.org/10.48190/cumbres.v3n1a19>
- [35] S. Rojas Marmolejo, "Cálculo de precipitaciones y caudales de diseño de sistema de drenaje pluvial urbano en zonas de Huancavelica," Universidad de Huancavelica, Perú, 2018.
- [36] A. Memduhoğlu, "Identifying impervious surfaces for rainwater harvesting feasibility using unmanned aerial vehicle imagery and machine learning classification," *Advanced GIS*, vol. 3, no 1, Art. no 1, 2023. doi: <https://orcid.org/0000-0002-9072-869X>
- [37] H. Aksu y M. A. Akgül, "Performance evaluation of CHIRPS satellite precipitation estimates over Turkey," *Theor Appl Climatol*, vol. 142, no 1, pp. 71-84, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.20>
- [38] C. Toté, D. Patricio, H. Boogaard, R. van der Wijngaart, E. Tarnavsky, y C. Funk, "Evaluation of Satellite Rainfall Estimates for Drought and Flood Monitoring in Mozambique," *Remote Sensing*, vol. 7, no 2, pp. 1758-1776, 2015. doi: <https://doi.org/10.3390/rs70201758>
- [39] T. Dinku, C. Funk, P. Peterson, R. Maidment, T. Tadesse, H. Gadain, y P. Ceccato, "Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa," *Quart J Royal Meteorol Soc*, vol. 144, no S1, pp. 292-312, 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- [40] C. Le Noir, N. G. Cayo, A. Araoz, M. Veliz, A. Cardoso, R. Fuentes, M. Coria y J. H. A. Rocha, "Evaluación de la factibilidad del uso de datos satelitales en la extensión de las series cortas de precipitación para las estaciones terrestres en el contexto de la cuenca del Río Taquiña - Cochabamba, Bolivia," UNIVALLE. 2022. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/366205297_Evaluacion_de_la_factibilidad_del_uso_de_datos_satelitales_en_la_extension_de_las_series_cortas_de_precipitacion_para_las_estaciones_terrestres_en_el_contexto_de_la_cuenca_del_Rio_Taquiña_-_Cochabamba
- [41] C. Amisse, A. M. L. Machado, y J. A. S. Centeno, "Extraction of geometrical information used in photovoltaic and rainwater harvesting potential estimation from UAV optical images," *RBE*, vol. 25, no 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i3.460>
- [42] (EPA) Environmental Protection Agency, "Managing Wet Weather with Green Infrastructure: Rainwater Harvesting Policies," 2008.
- [43] (NSW) Department of Environment and Conservation, "Managing Urban Stormwater: Harvesting and Reuse," Australia, 2006.
- [44] (NHS) National Services Scotland, "Research Report Rainwater Harvesting. Inglaterra," Inglaterra, 2013.

Miel como inductor de compuestos fenolicos, flavonoides y de crecimiento de fruto de mango var. ataúlfo

Honey as an inducer of phenolic compounds, flavonoids and growth of mango fruit var. ataúlfo

Víctor Jesús Albores-Flores¹, Julieta Grajales-Conesa², Grisel Pérez-Santos³, Karina Janeth Pérez-Escobar⁴, José Alfonso López-García⁵, Claudia Ivette Albores-Flores⁶, Marycarmen Utrilla-Vázquez⁷

Fecha de recepción: 14 de mayo, 2023

Fecha de aprobación: 27 de setiembre, 2023

Albores Flores, V. J; Grajales Conesa, J; Pérez Santos, G; Pérez-Escobar, K. J; López-García, J. A; Albores-Flores, C. I; Utrilla-Vázquez, M . Miel como inductor de compuestos fenolicos, flavonoides y de crecimiento de fruto de mango var. ataúlfo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 134-143.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6723>

1 Universidad Autónoma de Chiapas. Instituto de Biociencias. Chiapas, México.

2 Universidad Autónoma de Chiapas. Instituto de Biociencias. Chiapas, México.

 <https://orcid.org/0000-0002-1522-5646>

3 Universidad Autónoma de Chiapas. Instituto de Biociencias. Chiapas, México.

 <https://orcid.org/0009-0008-8195-7870>

4 Universidad Autónoma de Chiapas. Instituto de Biociencias. Chiapas, México.

 <https://orcid.org/0009-0003-2477-6954>

5 Universidad Autónoma de Chiapas. Instituto de Biociencias. Chiapas, México.

 <https://orcid.org/0000-0001-8993-689X>

6 El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México.

Correo electrónico: alboresflores@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0834-9576>

7 Universidad Politécnica de Tapachula. Chiapas, México.

 <https://orcid.org/0000-0001-8779-8876>

Palabras clave

Miel; fruto; fenoles; etapas; hojas; defensas.

Resumen

La producción de miel tiene vestigios ancestrales, considerando a Apis como la más domesticada y comercializada. Por otro lado, las abejas meliponinas, que tienen vestigios precolombinos han sido poco estudiadas y tiene propiedades fisicoquímicas importantes y de gran valor para ser usadas en el área agrícola. El cultivo del mango, del cual dependen una variedad de familias por ser un soporte socioeconómico, además de lo anterior, se le invierte bastante para sostenerlo con un buen manejo agronómico, donde hay insuficiente herramientas biológicas que permitan dar una producción menos dañina al ambiente. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la acción elicitora de metabolitos de defensa y de la inducción de crecimiento de los frutos de mango al aplicar miel. El estudio se llevó a cabo en el rancho San Juan, en el municipio de Tapachula, Chiapas. Se establecieron 4 tratamientos en campo, considerando las etapas de producción del fruto de mango. Se encontró diferencias significativas entre las concentraciones de fenoles totales analizadas en hojas y entre todos los tratamientos, observando que es mejor realizar la aplicación de miel después de la floración y durante el crecimiento del fruto de mango. No importa la concentración de miel utilizada, ambas estimulan el crecimiento del fruto de mango. Se encontró una relación significativa entre las concentraciones de fenoles, tiempo de aplicación y crecimiento del fruto de mango, con miel de *M. beecheii*.

Keywords

Honey; fruit; phenols; stages; leaves; defenses.

Abstract

The production of honey has ancestral vestiges, considering Apis as the most domesticated and commercialized. On the other hand, meliponine bees, which have pre-Columbian remains, have been little studied and have important physicochemical properties of great value for use in agriculture. Mango cultivation, on which a variety of families depend for being a socioeconomic support, in addition to the above, is invested enough to sustain it with good agronomic management, where there are insufficient biological tools that allow for less harmful production to the environment. The objective of this work was to evaluate the eliciting action of defense metabolites and the growth induction of mango fruits when applying honey. The study was carried out at the San Juan ranch, in the municipality of Tapachula, Chiapas. Four treatments were established in the field, considering the production stages of the mango fruit. Significant differences were found between the concentrations of total phenols analyzed in the leaves and between all the treatments, observing that it is better to apply honey after flowering and during the growth of the mango fruit. No matter the concentration of honey used, both stimulate the growth of the mango fruit. A significant relationship was found between the concentrations of phenols, application time and growth of the mango fruit, with *M. beecheii* honey.

Introducción

El manejo agronómico de los cultivos frutales, presenta una variedad de limitaciones desde su establecimiento, injertado, promoción de tejido vegetal, inducción de los diferentes etapas de producción cada año, aumentando estos cuando son jóvenes los árboles y dificultándose conforme presentan más edad [1, 2].

A pesar que el desarrollo tecnológico ha tenido avances significativos, la falta de tecnología agrícola confiable y de poco impacto sobre el ambiente es muy escasa. El uso de drones ya es una realidad, pero no es suficiente para sufragar las necesidades fitosanitarias y menos para orquestar una buena producción que sostenga y prometa un fruto de mejor calidad [3, 4].

El cultivo del mango, centro de generación de empleo temporal para varias familias y permanente, para unas cuantas minorías, es reconocido como un alimento frutal de alta importancia a nivel mundial. Este cultivo, susceptible al manejo agrícola también presenta problemas fitosanitarios, como son las enfermedades fúngicas, como antracnosis que provoca pérdidas de producción del 60% o más [3, 5]. El manejo fitosanitario convencional se sostiene del uso de productos agroquímicos, que además de afectar al ambiente, repercute negativamente sobre la biodiversidad y principalmente sobre los polinizadores [6]. Entre las estrategias menos agresivas al ambiente, se ha utilizado la resistencia inducida, que es una estrategia de control emergente que puede usarse para este fin [7]. A lo anterior se suma el uso de fertilizantes que proporcionen un equilibrio nutrimental y hormonal, que fortalezca el amarre de los frutos y estimule su crecimiento, encontrando que las alternativas biológicas o naturales son escasas [8].

Es urgente utilizar productos de origen natural que actúen como fungicida y bactericidas, e incluso sean elicitores para inducir resistencia en las plantas [9]. Las moléculas antes mencionadas son compuestos que actúan a nivel metabólico e inducen una señal directa para activar mecanismos de defensa química y bioquímica en las plantas, dando como resultados la producción de diversos metabolitos, los cuales en su mayoría son compuestos fenólicos y flavónicos [10].

Los extractos vegetales de tipo alcohólico u acuoso, microorganismos entre otros, han demostrado presentar acción inductora de resistencia en plantas e incluso árboles y por otro lado, un grupo de investigación del Instituto de Biociencias, preocupados por el uso de desarrollo de nuevos procesos de Fito sanidad y fisiológicos que no afecten la biodiversidad del agro-ecosistema y a los polinizadores, han incursionado en esta área para acrecentar el conocimiento del uso de productos biológicos y de origen natural, publicando en el 2018 [11], avances del uso de miel con acción anti fúngica sobre el desarrollo de *Colletotricum gloeosporioides*, principal causante de antracnosis en cultivos de mango.

También se ha demostrado que la miel se puede utilizar a nivel de campo sin presentarse consecuencias de atracción de hormigas, se utilizó como adherente o fertilizante foliar con resultados significativos. Aplicaciones en el campo agrícola Incluyendo lo antes expuesto es difícil de imaginar que la miel, producida tanto por abejas *Apis mellifera* como por abejas Meliponinos, pudieran ser usadas en las actividades diarias en el manejo agrícola, tanto a nivel de invernadero, pos cosecha y de producción en campo. Las investigaciones realizadas en México, a partir del 2001, reportaron el uso de miel de abeja *Apis* como complemento nutrimental de plántulas de tomate con la finalidad de obtener plantas de alto vigor y buena calidad de trasplante [12]. A lo antes expuesto, el objetivo del presente estudio de investigación fue evaluar la acción elicitora de metabolitos de defensa y de la inducción de crecimiento de los frutos de mango al aplicar miel.

Materiales y métodos

El estudio fue realizado en un cultivar de mango ataúlfo, localizado en Tapachula, Chiapas, México en el km 227.5 con la ubicación geográfica Lat. 14°54'25.0"N, Lon. 92°17'43.0"W. En los periodos de octubre de 2021 hasta junio del 2022.

Se recolectaron las muestras de miel de la especie *Melipona beecheii* a la que se le determinó pH (potenciómetro), grados brix (refractómetro).

Se realizó un diseño factorial 3^2 completamente al azar con 3 testigos: Positivo 1 (ácido salicílico), Positivo 2 (Agromil-V®) y negativo (agua). De manera general, los tratamientos se distribuyeron en las etapas del cultivo: 1) inducción de floración, 2) floración y 3) crecimiento y llenado del fruto.

Los lapsos de aplicación de cada tratamiento se realizaron cada 21 días durante 3 meses por aspersión en los tejidos foliares de los árboles de mango y frutos desde el amarre de estos, con la ayuda de bombas de mochila de capacidad de 20 L, con aplicación manual. En los tratamientos positivo 1 y 2 se utilizaron inex como adherente. El inductor de crecimiento de frutos (Agromil-V®) se aplicó en la semana 3, 7 y 11 de crecimiento.

De forma semanal se midió la severidad por antracnosis en las hojas de los árboles de mango. Cada árbol se dividió en 4 secciones, analizando hojas y frutos de cada sección del árbol. Se colectó muestra de hoja y frutos de cada sección del árbol de mango y se realizó la evaluación de fenoles y flavonoides. Tanto hojas como cascara de fruto colectadas fueron secadas por 72 horas a 40°C. Se trituraron y se pasaron por tamices de malla de 150 mm, hasta coleccionar un polvo tipo harina. Se utilizó 1.0 gr de harina de hojas y frutos de mango por separado para elaborar un extracto metanólico al 5%, y se utilizó para la determinación de fenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu [11], expresados como mg EAG/g y de flavonoides [13], expresado como mg EQ/g.

Cada semana se midió el fruto con una cinta métrica el largo y ancho del fruto.

Los datos obtenidos se analizaron con un ANOVA y una prueba de tukey $p > 0.05$. También se realizó una prueba de correlación de Pearson para determinar relaciones entre variables.

Resultados

El análisis de la miel, indicó que es ácida con valor de pH de 3.0 (± 0.12) y de grados brix de 76.03 (± 0.91).

Se observó que la severidad de las hojas de mango (Figura 1), antes de la etapa de floración (las primeras 3 semanas de evaluación), los valores entre los tratamientos fue similar ($p = 0.058$). En la etapa de floración (la semana 4 y 5 de estudio), se redujo este valor en los tratamientos que recibieron miel de *M. beecheii*, independientemente de la concentración utilizada ($p = 0.032$). Los valores de severidad en los tratamientos testigo, fue superior al 40%. La severidad se redujo por debajo del 30% en los tratamientos de miel y del testigo positivo, a partir de la semana 6 y fue decreciendo este valor hasta alcanzar un mínimo de 18 % en la semana 19, correspondiendo este lapso de tiempo al crecimiento del fruto.

Se pudo observar (Figura 2) que en las primeras tres semanas de estudio (correspondiente a la etapa pre floración), los tratamientos testigos presentaron valores similares en fenoles, en el tratamiento de miel baja se redujo los valores, a diferencia del tratamiento alta de miel donde los valores fueron de forma creciente. En las semanas 4 y 5, donde se llevó a cabo la etapa de floración, los tratamientos testigo fueron similares al tratamiento de miel concentración baja y únicamente la miel a concentración alta se elevaron los valores de fenoles por arriba del valor de 0.25 mg EAG. El tratamiento baja de miel presentó valores altos, a partir de la semana 8 y el tratamiento alta de miel, los valores altos se presentaron después de la semana 3.

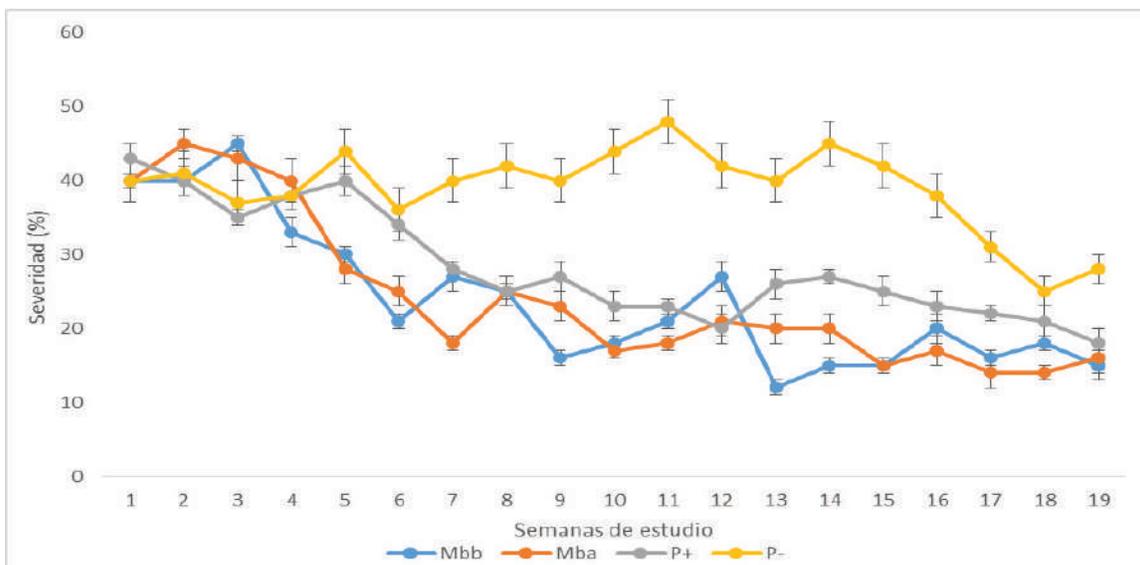


Figura 1. Valores de severidad de las hojas de mango en todos los tratamientos. (Mbb: concentración baja de miel, Mba: concentración alta de miel, P(+): testigo positivo, P(-): testigo negativo).

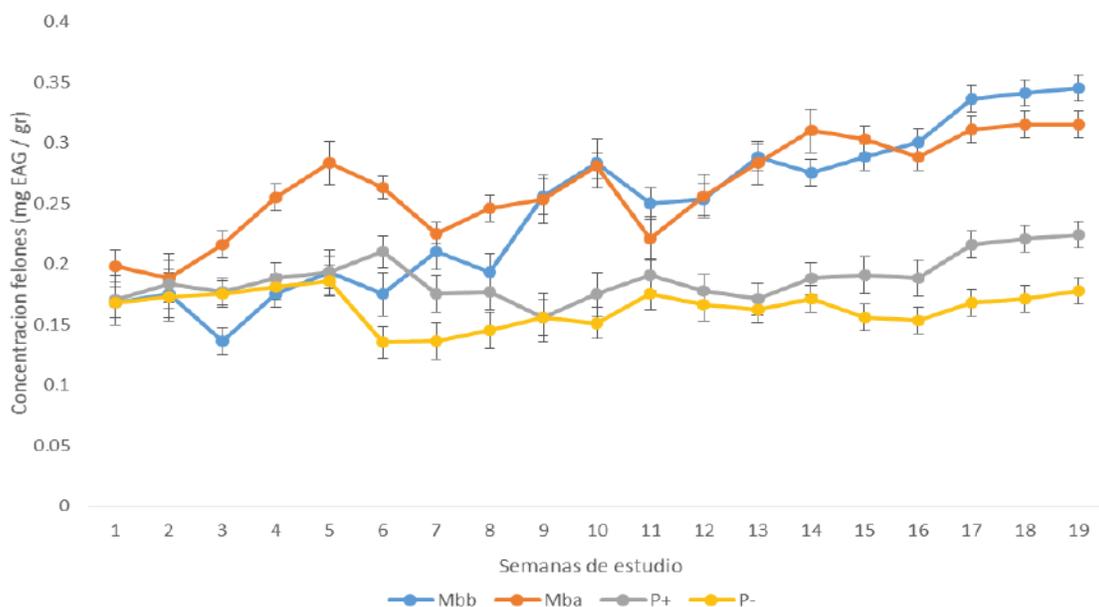


Figura 2. Valores de fenoles totales en las hojas de mango en todos los tratamientos. (Mbb: concentración baja de miel, Mba: concentración alta de miel, P(+): testigo positivo, P(-): testigo negativo).

La cantidad de flavonoides presentes en las hojas de mango, se observan en la figura 3. En la etapa pre floración (los primeros 3 semanas), el tratamiento de miel a concentración alta presentó los valores mas altos, diferenciandose de los demás tratamientos. En la etapa de floración (semana 4 y 5) y en las primeras 3 semanas de crecimiento del fruto (semana 6 al 8), todos los tratamientos presentaron valores similares de flavonoides. De la semana 8 a la semana 15, se presentaron valores máximos de flavonoides en los tratamientos de miel y en el testigo positivo. Únicamente el testigo negativo, no presentó esta variación.

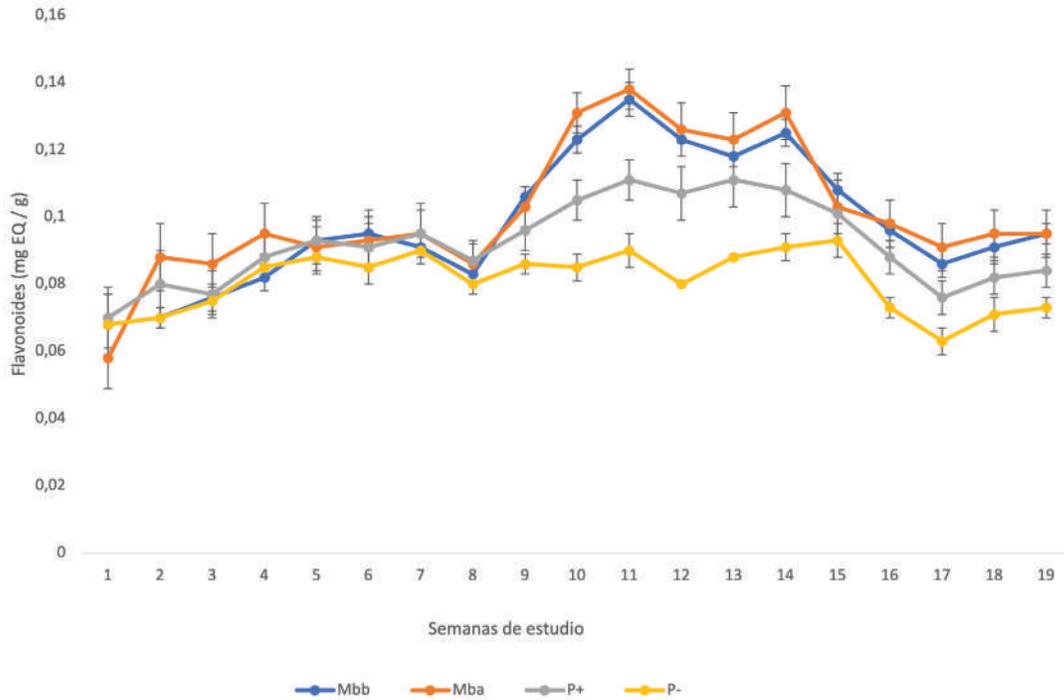


Figura 3. Valores de concentración de flavonoides en hojas de mango en todos los tratamientos. (Mbb: concentración baja de miel, Mba: concentración alta de miel, P(+): testigo positivo, P(-): testigo negativo).

Se encontró que los tratamientos que recibieron las dos concentraciones de miel (Figura 4), presentaron tamaños de frutos similares durante todas las semanas de estudio. A partir de la cuarta semana de crecimiento (semana 9 de estudio), los tratamientos testigos fueron presentando menor valor de longitud, siendo los frutos mas pequeños los que no recibieron producto alguno a diferencia de los frutos que recibieron el estimulador de crecimiento, presentando valores similares a los tratamientos de miel en las semanas 7, 8, 11, 12 y 13.

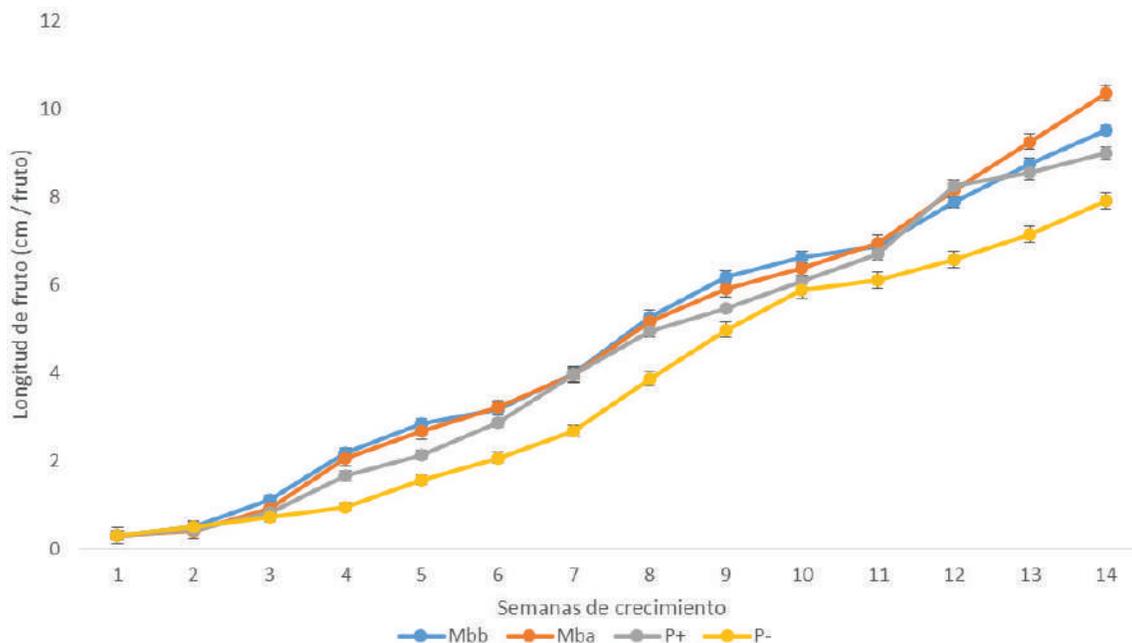


Figura 4. Valores de longitud de fruto de mango en todos los tratamientos. (Mbb: concentración baja de miel, Mba: concentración alta de miel, P(+): testigo positivo, P(-): testigo negativo).

Se encontró valores de correlación entre la severidad y fenoles, de -0.86 y -0.88 en los tratamientos de miel baja y alta respectivamente. En los testigos, los valores fueron de -0.56 y -0.37 en los tratamientos testigo positivo y negativo, respectivamente.

Entre el crecimiento y fenoles, los valores de correlación fueron de 0.91 y 0.90 en los tratamientos miel baja y alta, respectivamente. En los testigos los valores fueron menores, siendo 0.58 y 0.48, en testigo positivo y negativo, respectivamente.

Los valores de correlación entre flavonoides y severidad fueron: de la semana 6 a las 19 el valor fue de -0.76, -0.75 y -0.58, para miel alta, baja y testigo positivo, respectivamente. De la semana 1 a las semana 6, fue de -0.28, -0.32, -0.33 y -0.24 para miel baja, alta, testigo positivo y negativo, respectivamente.

Los valores entre crecimiento del fruto y flavonoides fueron: 0.63, 0.62, 0.55 y 0.48, para miel alta, baja, testigo positivo y negativo, respectivamente.

Discusión

La reducción de la severidad observada en los tratamientos que recibieron soluciones de miel (figura 1), a partir de la quinta semana de estudio, hace pensar tres explicaciones:

- a) Que el contacto que tuvo la miel con la superficie de las hojas inhibió el desarrollo de los hongos fito-patógenos en esta superficie, similar a lo que reportan Albores [11],
- b) Que los componentes de la miel penetraron la cutícula presente en las hojas [14] y ejercieron actividad inhibitoria [11] sobre los hongos que habían infectado el tejido, evitando que estos siguieran dañándolo y
- c) Que los componentes de la miel que penetraron la cutícula, activaron mecanismos de defensa (como fenoles y flavonoides, figura 2 y 3, [15, 16] para contrarrestar el daño y que las hojas se pudieran defender de los hongos patógenos presentes.

La biosíntesis de compuestos fenólicos, base en el metabolismo primario para la generación de pared celular y división celular en tejido de todas las plantas, se efectúa desde la formación de hojas, flores y frutos [17, 18], esto explica la presencia de fenoles desde el inicio del estudio. El cambio en la concentración de fenoles y flavonoides a través del tiempo, es un resultado de los cambios fisiológicos y fenológicos que suceden en los órganos vegetales, suscitándose la biosíntesis de defensas después de cierta edad del tejido [19, 20]. Estos niveles pueden cambiar si se aplican estimulantes, de origen sintético o biológico para apoyar a las defensas de las plantas [15, 16], lo anterior fue lo que logró observar con los tratamientos de miel y el testigo positivo.

La miel como sustancia producida por abejas a base de néctar de las flores y con una cantidad alta de compuestos fenólicos, ha demostrado actuar como agente anti fúngico y tener potencial de ser inductor de compuestos fenólicos [21, 11]. Las propiedades que presentan las mieles, de forma general, siendo tanto hidrofóbicas como hidrofílicas, permite que sean utilizadas en el área agrícola, para producción de cultivos de plantas, tal como lo explicó Villegas [12] en el cultivo de tomate. Por lo anterior, lo observado en el crecimiento del fruto (Figura 4), donde tanto los tratamientos con soluciones de miel y del inductor Agromil-V (testigo positivo), hacen pensar dos explicaciones:

1. Que además del soporte nutrimental que reciben los frutos durante su crecimiento, de las hojas (foto-sintatos), los compuestos fenólicos recibidos de forma externa (en los tratamientos de miel), permitieron promover la elongación de este órgano y mantuvieron la sanidad de estos [11, 22], logrando que los nutrientes recibidos se utilizaron en su

totalidad y más eficientemente, en la división celular y en la elongación del fruto, logrando con ello, obtener frutos más grandes que el testigo negativo y de tamaño similar al testigo positivo.

2. Debido a los componentes que contienen las mieles, como son vitaminas, enzimas, aminoácidos, azúcares, proteínas, fenoles, flavonoides, entre otros [23], estimularon la etapa de elongación celular presentado en la semana 4 y 9 (Figura 4), que corresponde a la diferenciación celular y etapa de termino de llenado con maduración del fruto. En estas etapas apoyaron la formación de foto-asimilados formados en las hojas al mejorar el crecimiento del fruto. Los azúcares administrados de forma exógena (por la miel), actuaron de forma energética sobre la división y elongación celular [24], los aminoácidos, vitaminas, fenoles y flavonoides, aplicados de forma exógena, favorecieron a la biosíntesis de compuestos estructurales y de hormonas para aumentar el crecimiento celular del fruto, al acelerar el metabolismo, dando como resultados cambios fisiológicos importantes y el aprovechamiento eficientes de todos los componentes indispensables para que este órgano creciera [25].

Conclusiones

La miel redujó más del 30 % la severidad en las hojas de los árboles de mango y aumento la concentración de fenoles por arriba de los 0.30 mg EAG / gr de hoja.

Las soluciones de miel, incrementó la concentración de flavonoides en la etapa de crecimiento del fruto de mango, específicamente en la etapa de mayor crecimiento que fue a partir de la 3ª semana hasta la semana 10 de crecimiento.

Las soluciones de miel de *Melipona beecheii*, aplicadas por aspersión en campo a los árboles de mango presentaron actividad elicitora sobre la producción de fenoles y actividad anti fúngica en tejido foliar de los árboles de mango.

La miel de *M. beecheii* presenta potencial de uso para estimular el crecimiento del fruto de mango.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Licenciada Maria Luisa Palacios y Palacios y al doctor Roberto Canell Aquino, por dar el permiso para efectuar el estudio en su predio commercial de cultivo de mango.

Referencias

- [1] SIAP and Secretaria de agricultura y desarrollo rural, "Expectativas agroalimentarias", editors SIAP y SADER, Ciudad de México, 2023, pp 64.
- [2] M. E. García Álvarez, "Plantación y tecnología del cultivo", Editores: A. E. García Álvarez, "Instructivo técnico para el cultivo del mango", Habana, Cuba, 2023, pp. 40.
- [3] P. Arús, "Agriculture of the future: Science and technology for sustainable agricultural development". *Métode science studies journal*, 10:33-39, 2020, DOI: 10.7203/metode.10.12546
- [4] J. L. López-González, E. Salgado-Villavicencio, J. F. Aguirre-Cadena, J. A. Méndez-Espinosa, "Agricultura de temporal y seguridad alimentaria en familias campesinas, un estudio de caso en Puebla-México", *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 20: 109-124, 2023, <https://doi.org/10.22231/asvd.v20i1.1531>
- [5] R. Sing & Deepankar, "Modeling for anthracnose development in mango in relation to weather parameters", *Australasian Plant Pathology*, 49: 285-294, 2020.



- [6] T. Y. Duran, C. G. Otero, A. L. D. Ortega, P. V. J. Arriola, A. J. A. Mora, N. A. Damián, E. P. García, "Evaluación de insecticidas para control de trips y ácaros plaga del mango (*Mangifera indica* L.) en tierra caliente, Guerrero, México". *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(3), 2017, pp. 381-394.
- [7] J. Flores-García, M. Madrid González, S. A. Nodal, "Uso de *Bacillus* sp. Como inductor de resistencia en nopal frente a la pudrición escamosa", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14: 25-37, 2023. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v14n1/2007-0934-remexca-14-01-25.pdf>
- [8] C. Tiyyayon & R. E. Paull, "Mango Production", In "Handbook of mango fruit: production, postharvest science, processing technology and nutrition", editors M. Siddiq, J. Brecht y S. Sidhu, *John Wiley & Sons*. June, pp: 17-35, 2017.
- [9] L. L. H. Calcedo, A. A. L. Villagómez, O. D. Sáenz de la, G. C. E. Zavala, M. E. Espinoza, Z. H. Romero, "Elicidores: implicaciones bioéticas para la agricultura y la salud humana", *Revista Bioética*, 29: 76- 86, 2021.
- [10] M. S. García y M. J. M. León, "Estrategia para mejorar la producción de metabolitos secundarios en plantas" *Ciencia UANL*, 24: 106, 2021.
- [11] Albores F. V., Marín S. I. J., López G. J.A., Sánchez G. A., y Grajales C. J. Antifungal property of honey on in vitro development of *Colletotrichum gloeosporioides*. *Revista mexicana de fitopatología*, vol. 36, no 3, pp. 423-431, 2018.
- [12] T. O. G. Villegas, Ma de las N. Rodríguez, L. I. Trejo, G. G. Alcántar, "Potencial de la miel de abeja en la nutrición de plántulas de tomate", *Terra Latinoamericana*, 19: 97-102, 2001.
- [13] V. Albores-Flores, E. Saavedra-Camacho, J. A. López-García, J. Grajales-Conesa, L. C. Córdova-Albores, "Caracterización fisicoquímica, actividad antioxidante y antifúngica de agregado de polen de tres especies de abejas (Apidae: Meliponini) provenientes del Soconusco, Chiapas", *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39: 41-60, 2021, <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2009.4>
- [14] L. del C. González García, A. Sánchez Estrada, J. N. Mercado Ruiz, R. Báez Sañudo & A. González León, "Inducción de cambios de tamaño, color y en cutícula en bayas de uva de mesa por medio de bioreguladores: Cambios en bayas de uvas de mesa", *Biotecnia*, 25(2), 113-119, 2023, <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i2.1874>
- [15] G. J. Góngora-Chi, J. Lizardi-Mendoza, Y. L. López-Franco, M. A. López-Mata, L. Quihui-Cota, "Métodos de extracción, funcionalidad y bioactividad de saponinas de *Yucca*: una revisión", *Biotecnia*, 25: 147-155, 2023. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i1.1800>
- [16] Anjali, S. Kumar, T. Korra, R. Thakur, R. Arutselvan, A. Shankar, Y. Nehela, V. Chaplygin, C. Keswani, "Role of plant secondary metabolites in defence and transcriptional regulation in response to biotic stress", *Plant Stress*, 8: 1-19, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100154>
- [17] A. Millán-Laleona, S. Núñez, F. Les, F. J. Bielsa, P. Errea, V. López, "Estudio comparativo de propiedades funcionales de variedades comerciales y autóctonas de manzana (*Malus domestica* Borkh)", in *Avances en maduración y poscosecha de frutas y hortalizas*, 1ª edición, Zaragoza, España, E. Arias Álvarez, S. Remón Oliver, R. Oria Almudí. 2022. Capítulo 2, sección 1, pp 14 – 17.
- [18] M. A. Camacho-Escobar, D. A. Ramos-Ramos, N. Y. Ávila-Serrano, E. I. Sánchez-Bernal, S. J. López-Garrido, "Las defensas físico-químicas de las plantas y su efecto en la alimentación de los rumiantes", *Terra Latinoamericana*, 38(2): 443-453, 2020
- [19] H. G. Martijn ten, P. Deberdt, M. Mbenoun, y C. Cilas, "Modelling cacao pod growth: Implications for disease control", *Annals of Applied Biology*, 160: 260-272, 2012.
- [20] S. Kaur, M. K. Samota, M. Choudhary, A. K. Pandey, A. Sharma, J. Thakur, "How do plants defend themselves against pathogens-biochemical mechanisms and genetic interventions", *Physiology and molecular Biology and plants*, 28(2): 485-504, 2022, doi: 10.1007/s12298-022-01146-y.
- [21] T. C. Espinoza, O. A. Vázquez, S. R. Torres de los, G. A. López, V. J. Albores and J. Grajales, "Mieles de abejas sin aguijón del Soconusco, Chiapas: enfoque complementario." *Revista de Biología Tropical*, 66(4): 1536, 2018.
- [22] Viveros L. J. L., Sarma S. S. S., Guerero Z. L. A., Rodríguez D. A. (2018). Bioensayo del efecto de fenoles producidos por *Myriophyllum aquaticum* en cultivo de *Lactuca sativa*. *Hidrobiología*. Vol. 28, pp. 109-119, 2018.
- [23] C. M. E. García, R. E. Armenteros, A.M. Escobar, C. J. A. García, M. J. Méndez & C. G. Ramos, "Composición química de la miel de abeja y su relación con los beneficios a la salud" *Revista Médica Electrónica*, 44: 155-167, 2022. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1684-18242022000100155&lng=es&tlng=es.

- [24] B. M. H. Pérez, B. A. Álvarez, G. E. Avitia, 24.- L. A. I. Pérez, C. M. V. Santos, "Temperatura y desarrollo floral en la formación de frutos partenocápicos en mango "Ataúlfo"", *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 23: 199-210, 2019.
- [25] W. M. Elakbawy, S. M. M. Shanab, E. A. Shalaby, "Enhancement of plant growth regulators production from microalgae cultivated in treated sewage wastewater (TSW)", *BMC Plant Biology*, 22: 377, 2022. DOI: 10.1186/s12870-022-03764-

Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica

Design of a bridge health index for prioritization of technical interventions in Costa Rica

Giannina Ortiz-Quesada¹, César Garita-Rodríguez², Angel Navarro-Mora³, Gerardo Paez-González⁴, Alejandro Alfaro-Acuña⁵

Fecha de recepción: 8 de mayo, 2023

Fecha de aprobación: 2 de octubre, 2023

Ortiz-Quesada, G; Garita-Rodríguez, C; Navarro-Mora, A; Paez-González, G; Alfaro-Acuña, A. Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 144-154.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6718>

- 1 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gortiz@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7639-1499>
- 2 Escuela de Ingeniería en Computación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cesar@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4592-3266>
- 3 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ahnavarro@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0539-7014>
- 4 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: bpaez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3961-2157>
- 5 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: alfaro@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0005-8035-9914>

Palabras clave

Puentes; índice; evaluación; monitoreo; salud estructural; priorización.

Resumen

Actualmente, Costa Rica no cuenta con una metodología rigurosa que considere las variables requeridas para calificar la condición de la salud estructural de un puente o estructura de paso. Algunas instituciones utilizan criterios diversos para asignar una calificación a la evaluación de una estructura y esto genera que se obtengan resultados diferentes al priorizar intervenciones. La priorización de los proyectos de infraestructura vial es clave para invertir los recursos de la forma más eficiente posible. En este contexto, este artículo presenta una propuesta que busca estandarizar un índice de la condición de la salud estructural de un puente, que permita priorizar y asignar recursos de forma objetiva. Para este índice se utiliza la evaluación de la condición estructural de elementos críticos, así como matrices de riesgo relacionadas con amenazas sísmicas e hidrometeorológicas. Como resultado, el diseño de este índice involucra el análisis de una gran cantidad de variables mediante criterios técnicos y estadísticos.

Keywords

Bridges; index; evaluation; monitoring; structural health; prioritization.

Abstract

Currently, Costa Rica does not count with a rigorous methodology that considers the proper variables required to assess the structural health condition of bridges. Some institutions use different criteria in order to assign a rating to the evaluation of a structure and this generates different results when prioritizing interventions. The prioritization of road infrastructure projects is key to invest resources in the most efficient way possible. In this context, this article presents a proposal that seeks to standardize an index for the structural health condition of bridges, which allows prioritizing and allocating resources objectively. For this index, the evaluation of the structural condition of critical elements is used, as well as risk matrices related to seismic and hydrometeorological hazards. As a result, the design of this index involves the analysis of a large number of variables through technical and statistical criteria.

Introducción

Costa Rica es un país en desarrollo, con recursos limitados y enfrenta problemas económicos que han limitado su crecimiento, lo que exige que se haga una correcta inversión de los recursos disponibles para la solución de los principales problemas que enfrenta.

En estos problemas se encuentra la condición de la infraestructura vial. Según el Reporte de Competitividad Mundial del 2019 (última medición ya que durante el año 2020 no se calculó dicho índice) del Foro Económico Mundial, Costa Rica ocupa la posición 62 del mundo entre 141 economías, sin embargo, en el tema de calidad global de infraestructura se encuentra en la posición 63. De hecho, infraestructura vial es una de las 3 debilidades más fuertes que el país viene arrastrando desde hace más de 15 años según este reporte [1].

Esto implica que la priorización de los proyectos de infraestructura via es clave para invertir los recursos de la forma más eficiente posible. Para realizar la priorización de estas intervenciones, primero es necesario conocer de forma precisa la condición de las vías y el caso particular

de puentes, los cuales son un elemento primordial en el funcionamiento de la infraestructura vial. El uso de indicadores para la toma de decisiones para la intervención de puentes podría convertirse en un factor para el éxito.

Uno de los indicadores más utilizados para la evaluación de estructuras de puentes a nivel mundial y que son generalmente la base para la priorización de estructuras son los denominados índices de condición del puente (BCI, por sus siglas en inglés) o bien los índices de salud de puentes (BHI, por sus siglas en inglés). Ambos se entienden como un índice que evalúa el desempeño de un puente, desde la perspectiva estructural o funcional [2].

Los usuarios principales de estos índices son los administradores de puentes, para el seguimiento a los objetivos, priorización de proyectos de mantenimiento o reemplazo de puentes y el uso más importante de un BHI es identificar qué estructuras en el inventario están más deterioradas y necesitan urgentemente reparaciones.

Existen varias metodologías para el cálculo de estos índices, basado en el enfoque computacional utilizado, los métodos actuales para desarrollar índices de condición o salud se pueden agrupar en los siguientes cuatro grupos [2] :

Método basado en proporciones

Los métodos basados en proporciones asignan un BCI o número de condición de puente (BCN) basado en el porcentaje de la condición actual a la condición de la estructura cuando era nueva. El objetivo de este método es calcular el valor restante del puente. El BHI de California y el método del índice de salud utilizado por el software de gestión de puentes AASHTOWARETM, BrM (anteriormente Pontis).

Método basado en promedios ponderados

El enfoque de promedio ponderado es adecuado para planificar el mantenimiento del puente y las actividades de rehabilitación. El enfoque estima la condición de toda la estructura combinando las clasificaciones de condición de todos los elementos individuales del puente ponderados por su importancia o contribución a la integridad estructural del puente. Este enfoque es común en sistemas que dependen de datos de inspección a nivel de elemento. Los BCI utilizados en Australia (BCN), el Reino Unido (BCI), Sudáfrica (BCI) y Austria (BCI) son los ejemplos de enfoques de combinación ponderada.

Método de componente en peor condición

El enfoque de componentes en peor condición es común en los sistemas que realizan inspecciones en los componentes clave del puente. Este método se utiliza para extraer los defectos críticos en los componentes del puente. En este enfoque, el BCI se aproxima a la calificación del componente en la peor condición. Algunos estados también usan la peor (más baja) calificación del Inventario Nacional de Puentes (NBI) para informar las condiciones del puente en los paneles de control de desempeño. El Departamento de Transporte de Michigan utiliza la calificación NBI más baja en su Sistema de Pronóstico de Condición de Puente (BCFS). BCFS ayuda a Michigan con las decisiones de selección de proyectos de puentes. Las ICC alemanas y japonesas son ejemplos de este enfoque.

Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos no informan la condición del puente en una escala numérica. Describen una estructura como "Pobre", "Aceptable" o "Buena", según el estado de la condición y la importancia de los elementos bajo investigación. Washington, Florida y otros estados usan las clasificaciones de condición del NBI para clasificar los puentes como "Bueno", "Aceptable" o

“Malo”. El indicador de salud del puente utilizado por Roads and Maritime Services (fusión de Roads and Traffic Authority y New South Wales Maritime) en Sydney, Australia, es un ejemplo de la utilización de este método.

Combinación de métodos

Hay otros BHI que se desarrollaron combinando algunos de los métodos enumerados anteriormente. Un ejemplo, que ya no se usa en los Estados Unidos, son las calificaciones de suficiencia (SR), que combinan el promedio ponderado y los enfoques del componente de peor condición. El SR se utilizó en las decisiones de financiamiento. Además, en este informe también se analiza un método de priorización basado en el riesgo que el Departamento de Transporte de Nueva Jersey (NJDOT) está probando actualmente. Este enfoque combina diferentes estados límite de rendimiento para calcular el riesgo relativo percibido para cada puente.

Existen muchos trabajos científicos recientes que investigan diversos temas relacionados con métodos para cálculo de BCI. Por ejemplo, en [3] se define un marco de referencia para clasificar el nivel de madurez de indicadores de desempeño utilizados en el cálculo de un BCI, pues pueden existir muchos indicadores pero no todos son aptos o relevantes para el índice particular. En la tesis de maestría científica en Ingeniería Civil presentada por [4], se hace una comparación de diferentes BCI para determinar su nivel de adecuación para apoyar escenarios para toma de decisiones asociadas a asignación de financiamiento bajo diferentes niveles de incertidumbre. La resiliencia de un puente (capacidad de recuperación ante un evento que dañe la estructura) incluyendo parámetros como amenazas por región, geología, sismicidad, durabilidad, es un tema actual de investigación[2]. En [5] se presenta una metodología novedosa para cálculo de BCI enfocándose en aspectos de seguridad y confiabilidad de puentes.

Materiales y métodos

El Tecnológico de Costa Rica, por medio de sus centros de investigación, Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) y Centro de Investigaciones en Computación (CIC), pertenecientes a las Escuelas de Ingeniería en Construcción e Ingeniería en Computación, respectivamente; desarrolló el proyecto de investigación: “Propuesta de un índice de salud estructural para puentes (BHI) para Costa Rica” (2019-2020). Este proyecto representa una continuación del trabajo realizado en la última década del grupo de investigación multidisciplinario e-Bridge en el área de desarrollo de modelos y herramientas para el monitoreo de salud de puentes en Costa Rica (ver por ejemplo [6-14]).

Para obtener este índice, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de las metodologías aplicadas a nivel mundial, generando una tabla comparativa de los principales métodos, que incluyó: tipo de índice, metodología de cálculo, principales usos, ejemplos, ventajas y desventajas.

Se analizó la situación particular de Costa Rica y la información disponible, siendo elementos claves el Manual de Inspecciones de Puentes publicado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el contenido del inventario de puentes, generado por el Programa de Evaluación de Puentes del CIVCO, con información de más de 1600 estructuras, el análisis de indicadores para la priorización de puentes desarrollado para la Municipalidad del Guarco (ver [15]), indicaciones establecidas para el Diseño Sismorresistente de puentes en Costa Rica, publicado por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) e información disponible sobre riesgos de la Comisión Nacional de Atención de Emergencias y Prevención (CNE).

La información disponible, se comparó con los requerimientos de cada metodología de cálculo, con el fin de verificar su aplicación, además, de valorar los posibles usos.

Posteriormente, se estableció una metodología de cálculo específica, por medio de talleres de trabajo de los investigadores y validándola con actores claves del medio como ingenieros del MOPT y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), así como otros profesores del programa de Ingeniería en Construcción del TEC.

Para establecer el método de cálculo del BHI, se procedió a definir la función de este índice:

- **Definición:** El BHI es un índice de evaluación del desempeño de un puente, que contempla la perspectiva de la condición estructural del puente, basado en una inspección visual, el nivel de riesgo asociado al entorno y la importancia socioeconómica.
- **Posibles usuarios:** Administradores de puentes, en Costa Rica se identifican como posibles usuarios: MOPT, CONAVI, Municipalidades.
- **Posibles usos:** Establecer un nivel de daño de los puentes y priorizar sus necesidades de intervención.

El segundo paso fue definir la técnica o método de cálculo más apropiado, en este caso se propone el método basado en proporciones, esto debido a que actualmente el mayor problema que presenta el país está relacionado con la conservación de las estructuras de puentes y la priorización de los recursos disponibles, la metodología que más podría generar información para priorización de recursos de acuerdo con el estado del puente es la basada en promedios ponderados.

Sin embargo, por las condiciones del país sería de gran utilidad incluir otras variables, como pueden ser el riesgo y el posible costo de las intervenciones, por lo que finalmente, para el cálculo del BHI se proponen formas de cálculo que combinen el método de proporciones combinando con algunas consideraciones del entorno, relacionadas con la amenaza y vulnerabilidad de las estructuras.

Resultados

El BHI propuesto para Costa Rica, se basa en los resultados obtenidos de las evaluaciones de la condición de las estructuras, utilizando el valor de las inspecciones visuales. La estructura propuesta para el índice se muestra en la figura 1.

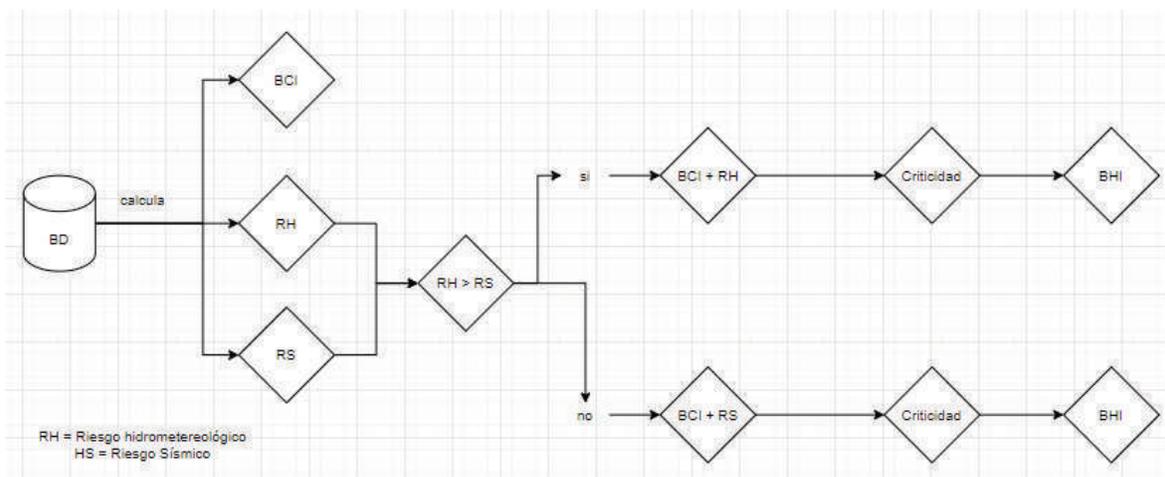


Figura 1. Esquema general para el cálculo del BHI

La base de datos (BD), es el resultado de la inspección visual de daños realizada por el inspector de puentes, adicionalmente se incluye información del entorno del puente.

En el primer nivel el BHI está compuesto por un índice de condición estructura (BCI), una estimación de la amenaza hidrometeorológica (RH) identificada de acuerdo con la ubicación del puente y una combinación entre la vulnerabilidad sísmica de la estructura y la amenaza sísmica identificada (RS).

Cálculo del BCI

La condición estructural del índice se calculó con base en los resultados de la inspección visual de daños realizada en cada puente, esta evaluación se realiza de acuerdo con el Manual de Inspección de Puentes del MOPT [16] y las mejoras propuestas por este grupo de investigación como la evaluación de los apoyos.

La evaluación de la condición estructural se refiere a la evaluación de la seguridad estructural de cada componente y elemento del puente de forma visual. Tiene una escala de 1 a 5, donde 1 es una condición excelente y 5 una condición deficiente.

Para la evaluación se utilizó estructuración indicada en el cuadro 1.

Cuadro 1. Estructuración utilizada para el cálculo del BCI.

Sistema	Componente	Elemento
Puente	Accesorios (*)	Pavimento Juntas de expansión
	Superestructura (**)	Losa Elementos principales Elementos secundarios
	Subestructura (***)	Apoyos Bastiones Pilas

(*) En los accesorios, no se consideró la evaluación de las barandas, ya que estas se evalúan en la condición de seguridad vial.

(**) En la superestructura se está agrupando a evaluar elementos principales (vigas de acero y vigas de concreto) y elementos secundarios (elementos de arrioste y vigas diafragmas).

(***) En la subestructura, se analizaron los apoyos, para lo cual se propuso una escala de valoración, bastiones y pilas.

Basándose en la BD, se calcularon los siguientes indicadores de condición: Índice de Condición de los Accesorios (BCI-Acc), Índice de Condición de la Superestructura (BCI-Sup), Índice de Condición de la Subestructura (BCI-Sub) y finalmente el Índice de Condición del puente (BCI) el cual contempla los anteriores.

El índice está concebido para mostrar valores finales en un rango de 1 a 5 como evaluación de un puente. El índice está compuesto por una estructura jerárquica de: componentes, elementos, y daños.

- **Daño:** En el nivel más bajo del índice, existe un conjunto de valores asociados al nivel de daño de variables asociadas al estado de un elemento particular. Los valores se definen en una escala de 1 a 5 de acuerdo con rúbricas establecidas en tablas de inspección de daños que se utilizan en las inspecciones técnicas de los puentes.

- **Elemento:** Los elementos corresponden con partes estructurales específicas de un puente. Cada elemento considera cierta cantidad de variables de daño con respectivo valor y peso. La suma de los pesos de los daños para un elemento es igual a 1. Algunos elementos pueden estar o no presentes, o variar su ponderación, según el tipo de puente que se está analizando.

$$elemento_i = \sum_{k=1}^n valor\ da\~{n}o_k * peso\ da\~{n}o_k \tag{1}$$

- **Componente:** Los componentes representan una clasificación o agrupación conceptual de los elementos de un puente. Cada componente a su vez considera una ponderación de los elementos que incluye, considerando la evaluación y peso de cada elemento. La suma de los pesos de los elementos es igual a 1.

$$componente_i = \sum_{k=1}^n evaluacion\ elemento_k * peso\ elemento_k \tag{2}$$

Para definir la ponderación de los elementos de cada componente, se utilizó el criterio experto e información obtenida en talleres realizados. Para la ponderación de cada uno de los elementos se utilizó el método Delphi- El primer estudio de Delphi fue realizado en 1950 por la Rand Corporation para la fuerza aérea de Estados Unidos, y se le dio el nombre de Proyecto Delphi, su objetivo era la aplicación de la opinión de expertos a la selección de un sistema industrial norteamericano óptimo y la estimación del número de bombas requeridas para reducir la producción de municiones. La capacidad de predicción de la metodología Delphi se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo emitido por un grupo de expertos.

Como ejemplo de la utilización del Método Delphi, se presenta el análisis de los daños por evaluar en el elemento pavimento del componente accesorios. Se evalúan ondulación, surcos, baches y sobrecapas de asfalto, no se evaluará el agrietamiento. En la figura 2 se presenta el análisis.

Pavimento	Ondulación	Surcos	Baches	Sobrecapas de asfalto	Sumatoria	Peso
Ondulación		1	0	0	2	0.2000
Surcos	0		0	0	1	0.1000
Baches	1	1		0	3	0.3000
Sobrecapas de asfalto	1	1	1		4	0.4000
					10	1.0000

Figura 2. Ejemplo de utilización Método Delphi para asignar ponderación de daños al pavimento.

El peso de cada elemento en la estructura dependerá de la tipología de cada puente, para este cálculo se han definido 4 tipos de puentes:

- **Tipo 1.** Puente de concreto, con apoyos y pilas. (Caso 01)
- **Tipo 2.** Puente de acero, con apoyos y pilas. (Caso 02)
- **Tipo 1.** Puente de concreto, con apoyos y sin pilas. (Caso 03)
- **Tipo 1.** Puente de acero, con apoyos y sin pilas. (Caso 04)

- **Finalmente**, se obtiene un valor de BCI con un valor numérico entre 1 y 5, utilizando la siguiente fórmula:

$$5\% BCI_{Acc} + 45\% BCI_{Sup} + 50\% BC_{Sub} \quad (3)$$

Riesgo sísmico (RS)

Para determinar este riesgo se calcula la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de la estructura valorando su ancho de asiento mínimo, para calcular finalmente la criticidad por sismo.

Para calcular la amenaza sísmica, se requiere determinar la aceleración pico efectiva (Ca), esta se obtiene de los Lineamientos para el Diseño Sismoresistente de Puentes [17]. Una vez calculado el Ca , se calcula la aceleración pico efectiva modificada por presencia de fallas activas cercanas, esta se calcula de la siguiente forma:

$$CaM = Coeficiente \times Ca \quad (4)$$

El valor del coeficiente es 1.2 si hay fallas activas cercanas y 1 si no hay fallas activas cercanas, la fuente para determinar la existencia de fallas es la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención, publicada en sus mapas de amenazas y el Código de Cimentaciones de Costa Rica. Posteriormente se calcula la amenaza sísmica con la siguiente fórmula:

$$Amenaza \ sísmica = \frac{CaM}{0,588} \times 4 - 1 \quad (5)$$

Por otra parte, se determina si el ancho de asiento que tiene el puente cumple con los requerimientos mínimos, para ello se mide el ancho de asiento en sitio (dato tomado de la inspección) y se compara con la fórmula establecida en los Lineamientos para el diseño sismoresistente de puentes [17]. Esta ecuación es una simplificación para estimar el ancho de asiento en un puente de un solo tramo. Sin embargo, se utiliza esta de forma generalizada, como una estimación preliminar de la vulnerabilidad del puente asociada a esta variable.

Para el cumplimiento se compara el ancho de asiento real con el mínimo requerido, se anota 1 si cumple y 5 si no cumple.

Finalmente, el RS será el máximo valor entre el cumplimiento de ancho de asiento y la amenaza sísmica.

Amenaza hidrometeorológica (RH)

Para determinar la amenaza hidrometeorológica, se analiza la amenaza de inundación, la relación del ancho del cauce aguas arriba y aguas abajo del puente, para finalmente calcular la criticidad hidrometeorológica.

En primer lugar, se define si la zona donde se encuentra la estructura es inundable, la fuente utilizada es la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención o la información establecida en el Plan GAM 2030. Si la zona es inundable se asigna un valor de 5, si no se asigna un valor de 1.

Posteriormente se calcula el estrechamiento del cauce, este cálculo se toma del informe del proyecto de extensión "Priorización de estructuras de puentes utilizando indicadores de desempeño. Plan piloto Municipalidad de El Guarco. 2018-2019", realizado por este grupo de investigación, realizando una adaptación a las condiciones que el inspector pueda observar durante la inspección visual de daños.

$$Estrechamiento \ del \ cauce = \frac{Ancho \ del \ cauce \ aguas \ arriba}{Ancho \ del \ cauce \ aguas \ abajo} \quad (6)$$

Con base en este valor se analiza la vulnerabilidad de la estructura, de acuerdo con los valores definidos en el cuadro 2, estos valores fueron establecidos por el grupo de investigadores.

Cuadro 2. Escala de calificación para el estrechamiento del cauce.

Valor del estrechamiento del cauce (E)	Calificación
$1.5 < E$	5
$1.3 < E \leq 1.5$	4
$1.1 < E \leq 1.1$	3
$0.9 < E \leq 1.1$	2
$E \leq 0.9$	1

El otro elemento que se analiza es la altura libre inferior de la estructura, esto permite analizar la capacidad hidráulica de la misma. Este dato es medido durante la inspección en campo. En el cuadro 3 se observa la escala de valoración.

Cuadro 3. Escala de calificación para el estrechamiento del cauce.

Altura libre inferior (h) en m *	Calificación
$h \leq 1.5$	5
$1.5 < h \leq 3.0$	4
$3.0 < h \leq 4.5$	3
$4.5 < h \leq 6.0$	2
$0.0 < h$	1

* Medición en campo, este valor se divide entre 2 cuando no hay evidencia del nivel de agua.

Con estos datos, se calcula el RH, escogiendo el mayor valor entre el estrechamiento del cauce, amenaza de inundación y altura libre inferior.

Cálculo BHI

Para el cálculo de BHI, se toman en consideración el BCI (estructural) y los BCI por sismo e hidrometeorológico (BS y BH), escogiendo el valor más crítico de estos dos, a este valor se le denomina criticidad.

Posteriormente, se introduce una variable relacionada con la importancia socioeconómica, esta se hace utilizando lo indicado en el cuadro 4.

Cuadro 4. Escala para la definición de la importancia económica del puente.

Importancia	Descripción	Características
1	Importancia socioeconómica baja	Otras rutas
2	Importancia socioeconómica media	Ruta terciaria o TPD mayor a 5 mil vehículos
3	Importancia socioeconómica media - alta	Ruta secundaria o TPD mayor a 20 mil vehículos
4	Importancia socioeconómica alta	Ruta primaria o TPD mayor a 50 mil vehículos
5	Importancia socioeconómica extrema	Ruta primaria estratégica con TPD mayor a 50 mil vehículos

Finalmente, para el cálculo del BHI, se utiliza la matriz mostrada en la figura 3, se introduce el valor de la importancia socioeconómica en importancia (columna) y la criticidad de la estructura (fila) que es el valor mayor entre el BCI, BS y BH.

		Criticidad				
		1	2	3	4	5
Importancia	1	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
	3	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	4	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
	5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

Figura 3. Matriz para cálculo del BHI.

Este valor del BHI tiene una escala entre 1 y 5. Con base en los colores observados en la figura 3, se puede decir que los valores en verde se consideran satisfactorios, los amarillos aceptables, los naranjas inaceptables y los rojos deficientes.

Conclusiones

La mayoría de los índices de salud están diseñados para ayudar a las partes interesadas a planificar el mantenimiento del puente y actividades de rehabilitación. Esto es típico en el enfoque de promedio ponderado y los enfoques basados en razones, que calculan el índice de salud general combinando todos los defectos identificados a nivel de elemento.

El índice de salud de puentes BHI propuesto, se puede calcular con información proveniente de las inspecciones visuales de los puentes recopilada en campo y utilizando información existente a nivel nacional como la generada por la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención y los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes del CFIA. Esto permitirá un uso mayor del BHI en los procesos de toma de decisiones iniciales, específicamente en la priorización inicial de las posibles intervenciones a realizar en los puentes.

El método propuesto se basa en promedios ponderados, con el fin de exponer la realidad del puente en cuanto a su condición estructural y agrega un análisis del entorno identificando los principales riesgos presentes en Costa Rica, como lo son la sismicidad y las condiciones hidrometeorológicas.

Incluye, además, un análisis básico de la importancia socioeconómica, relacionada con la cantidad de usuarios del puente, basado en el tránsito promedio diario (TPD).

El método es aplicable para los cuatro casos descritos, sin embargo, este puede extenderse a otros casos, realizando un ajuste en la ecuación que pondera los daños por componente presente en el puente.

Referencias

- [1] WEF, Annual Report 2019-2020, World Economic Forum, 2020.
- [2] S. B. Chase, Y. Adu-Gyamfi, A. Aktan, and E. Minaie, Synthesis of national and international methodologies used for bridge health indices, United States. Federal Highway Administration, 2016.
- [3] Maria Pina Limongelli, André Orcesi, and A. Vidovi, "The Indicator Readiness Level for the classification of Research Performance Indicators for road bridges," in Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018, Ghent, Belgium, 2018.

- [4] C. Zhang, "A Comparison among Three Bridge Performance Measures for Allocating Funds," Ohio State University, 2018.
- [5] M. G. Limongelli, Chatzi, E. and Anzllin, A., "Condition assessment of roadway bridges: from performance parameters to performance goals," *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 345-356, 2018.
- [6] G., and C. Garita, "A Business Intelligence Approach to Prioritize Bridge Maintenance Activities," 2022.
- [7] R. Cespedes-Deliyore, A. Ruiz-Barquero, C. Garita, and G. Ortiz, "General Design of a Power-Saving Strategy for a Collaborative Wireless Sensor Network," in XL IEEE Convention of Central America and Panama (CONCAPAN 2022), Panama, Panama, 2022.
- [8] A. Ruiz-Barquero, C. Garita, and G. Ortiz, "Collaborative Sensors Networks for Structural Health Monitoring of Bridges," in XLVI Conferencia Latinoamericana de Informática - CLEI 2020, Loja, Ecuador, 2020.
- [9] C. Garita, G. Ortiz, and J. Mora-Mora, "Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 4, pp. 63-72, Octubre, 2018.
- [10] C. Garita, and G. Ortiz, "Development of a Business Intelligence Prototype for Bridge Health Monitoring," in 3rd International Conference on Information Systems and Computer Science - INCISCOS 2018, Quito, Ecuador, 2018.
- [11] C. Garita, and G. Ortiz, "Integrando Información Estratégica para Monitoreo de Puentes Nacionales."
- [12] C. Garita, and G. Ortiz, "e-Bridge 3.0: A Strategic Approach to Structural Health Monitoring of Bridges in Costa Rica."
- [13] G. Ortiz, and C. Garita, "The e-Bridge 2.0 Approach for SHM of Bridges in Costa Rica," 2015.
- [14] C. Garita, and G. Ortiz, "Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges." pp. 489-497.
- [15] G. Ortiz, C. Garita, A. Navarro-Mora, and G. Paez, "Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores," *Tecnología en Marcha*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, Julio-Setiembre, 2021.
- [16] MOPT, Manual de Inspección de Puentes, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007.
- [17] CFIA, Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes, Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2013.