



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Julio- Setiembre 2023
Volumen 36-3
ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos

latindex

redalyc.org

Dialnet

melica

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Desarrollo Científico

DOAJ

Comisión Editorial

Felipe Abarca Fedullo. Director.
Editorial Tecnológica de Costa Rica

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

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

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

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Ariana Sanabria García

Imagen de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 36-3. Julio-Setiembre,
2023 – 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

Tecnología constructiva del Bambú Nativo. Otatea Fimbriata Soderstr., en el Estado de Chiapas, México Native Bamboo Construction Technology. Otatea Fimbriata Soderstr., in the State of Chiapas, Mexico <i>Hector Daniel Llaven-José, Gabriel Castañeda-Nolasco</i>	3
Comparación en altura de planta y producción de brotes entre dos variedades de pitahaya (<i>Hylocereus</i> sp.) Plant height and sprout production comparison between two varieties of pitahaya (<i>Hylocereus</i> sp.) <i>José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	13
Calibración de equipos de laboratorio en entornos universitarios: estrechando la brecha en materia de gestión metrológica Calibration of laboratory equipment in university environments: narrowing the gap in terms of metrological management <i>Manfred Murrell-Blanco, Ernesto Montero-Sánchez, Sherryl Campos-Morales, Ligia Bermúdez-Hidalgo, Karla Vetrani-Chavarría</i>	24
Optimización del diseño de un reactor de gasificación por plasma a través de simulaciones computacionales numéricas Design optimization of a plasma gasification reactor utilizing computational numerical simulations <i>Alberto Castillo-Benavides, Gustavo Richmond-Navarro, Esteban Zamora-Picado, Carlos Arias-Arguedas</i>	34
Estrategia de manejo de residuos sólidos para la comunidad de Colorado Norte, Pococí Solid waste management strategy for the community of Colorado Norte, Pococí <i>Maryan Hidalgo-Vargas, Lilliana Abarca-Guerrero, Ariana Solís-Blandón</i>	50
Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (<i>Allium cepa</i>) c.v. Álvara promedio en invernadero Reference evapotranspiration, actual evapotranspiration and crop coefficient for onion (<i>Allium cepa</i>) c.v. Alvara average in greenhouse <i>Adrián Enrique Chavarría-Vidal, Mario Morales-Sánchez, Freddy Soto-Bravo</i>	65

Impact of Blockchain on Latin American healthcare systems Impacto de Blockchain en los sistemas de salud latinoamericanos <i>Gabriel Silva-Atencio, Mauricio Umaña-Ramírez, Marian Valverde-Porras</i>	78
Desarrollo y validación de un método para la determinación de nitrito en productos cárnicos mediante cromatografía iónica Development and validation of a method for the determination of nitrite in meat products by ion chromatography <i>Priscilla Rojas-Alvarado, Laura Vindas-Angulo</i>	87
Adsorción y dosificación de Ca en suelos de Buenos Aires, Argentina Adsorption and dosage of Ca in soils of Buenos Aires, Argentina <i>Daniel A. Ferro, Brian Andreini, Víctor Merani, Luciano Larrieu, Matilde Mur, Facundo Guillino, Esteban Pereira, Tatiana Cinquetti, Guillermo Millán, José Augusto Imaz</i>	99
Simulación Monte Carlo de un haz de radiación de una fuente de cobalto 60 en condiciones de referencia Monte Carlo simulation of radiation beam of cobalt 60 source in reference conditions <i>Walter Vargas-Segura, Anthony Cordero-Ramírez</i>	115
Germinación in vitro de <i>Calibrachoa thymifolia</i> y <i>Calibrachoa missionica</i> nativas de la Argentina In vitro germination of <i>Calibrachoa thymifolia</i> and <i>Calibrachoa missionica</i> native to Argentina <i>Leticia Tombion, María Andrea Coviella, María Julia Pannunzio, María Silvina Soto, Paula Bologna</i>	127
Comportamiento de la intensidad de turbulencia en distintas áreas transversales en un túnel de viento Turbulence intensity behavior in several wind tunnel cross-sectional areas <i>Gustavo Richmond-Navarro, Carlos Arias-Arguedas, Pedro Casanova-Treto</i>	134
Artículo de revisión. Ácido úsnico: alternativa potencial contra la resistencia bacteriana actual Review article. Usnic acid: potential alternative against current bacterial resistance <i>Sharon Juliet Avila-Zamora, Yessica Dayana Pinzon-Perez, Jovanna Acero-Godoy</i>	145
Análisis de la modulación multiplexación por división de frecuencia generalizada Analysis of generalized frequency division multiplexing modulation <i>Jorge Luis Blanco-Orta, María del Carmen Guerra-Martínez, Francisco Reinerio Marante-Rizo</i>	158

Tecnología constructiva del Bambú Nativo. Otatea Fimbriata Soderstr., en el Estado de Chiapas, México

Native Bamboo Construction Technology. Otatea
Fimbriata Soderstr., in the State of Chiapas, Mexico

Hector Daniel Llaven-José¹, Gabriel Castañeda-Nolasco²

Fecha de recepción: 27 de marzo, 2022
Fecha de aprobación: 8 de julio, 2022

Llaven-José, H.D; Castañeda-Nolasco, G. Tecnología constructiva del bambú nativo. Otatea Fimbriata Soderstr., En el estado de Chiapas, México . *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 3-12.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6076>

1 Universidad Autónoma de Chiapas. México.
Correo electrónico: dann.arq10@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5237-1629>

2 Universidad Autónoma de Chiapas. México.
Correo electrónico: gabriel.castaneda@unach.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-0928-5551>

Palabras clave

Bambú nativo; materiales alternativos; bioconstrucción; Otatea; tecnología constructiva.

Resumen

Los bambúes son plantas pertenecientes a la familia botánica de las gramíneas (maíz, arroz, carrizo, caña de azúcar) y a la subfamilia Bambusoideae, la cual agrupa gran diversidad de especies distribuidas mundialmente, particularmente en el estado de Chiapas se encuentran gran parte de las especies registradas para México, mismas que por ser de índole natural pasan a ser subutilizadas y/o despreciadas dándoles el calificativo de rezago, prefiriendo por ello al empleo de materiales industrializados para la conformación de espacios habitables, mismos que están enmarcados bajo la noción de progreso. De esta forma, se plantea un proceso metodológico a partir de una investigación cualitativa, donde el marco teórico referencial se construyó mediante la revisión bibliográfica, bajo el objetivo de denotar la utilización y aprovechamiento del bambú nativo *Otatea fimbriata* Soderstr., encontrado localmente. En este sentido, la presente investigación permitió demostrar que el bambú nativo presente en el estado de Chiapas, es un recurso natural, cuyas propiedades físicas y mecánicas lo dotan de un alto potencial para ser aprovechado no solo en la conformación de espacios habitables, sino a la vez de generar diversidad de productos y servicios, llegando a impactar de forma positiva en las familias que integran a las localidades de Chiapas.

Keywords

Native bamboo; Alternative materials; Bioconstruction; Otatea; Construction technology.

Abstract

Bamboos are plants belonging to the botanical family of grasses (corn, rice, reed, sugar cane) and the subfamily Bambusoideae, which groups a great diversity of species distributed worldwide, particularly in the state of Chiapas are a large part of the species registered for Mexico, which because they are of a natural nature become underused and / or despised giving them the qualification of Lag, preferring therefore to the use of industrialized materials for the conformation of living spaces, which are framed under the notion of progress. In this way, a methodological process is proposed from a qualitative research, where the referential theoretical framework was built through the bibliographic review, under the objective of denoting the use and exploitation of the native bamboo *Otatea fimbriata* Soderstr., found locally. In this sense, the present research allowed to demonstrate that the native bamboo present in the state of Chiapas, is a natural resource, whose physical and mechanical properties endow it with a high potential to be used not only in the conformation of living spaces, but at the same time to generate diversity of products and services, reaching a positive impact on the families that make up the localities of Chiapas.

Introducción

El bambú es una planta perteneciente a la familia botánica de las gramíneas (maíz, trigo, caña, pastos) y a la subfamilia Bambusoideae que alberga a más 1650 especies, tanto leñosas como herbáceas, distribuidas a nivel mundial [1]. México está representado por 56 especies de las cuales 33 se encuentran en el estado de Chiapas [2], [3].

La morfología de estas especies, se compone principalmente por: un rizoma, tallo o culmo, hojas caulinares, ramas y follaje (Figura 1). Estas características morfológicas las dotan de múltiples cualidades para ser aprovechadas de formas distintas, dependiendo de su edad; diámetro y longitudes de tallos; parte del culmo; propósito para su empleo, llegándose a obtener: comida, vestido, material de construcción, herramientas de uso doméstico y agrícola [4]–[6].

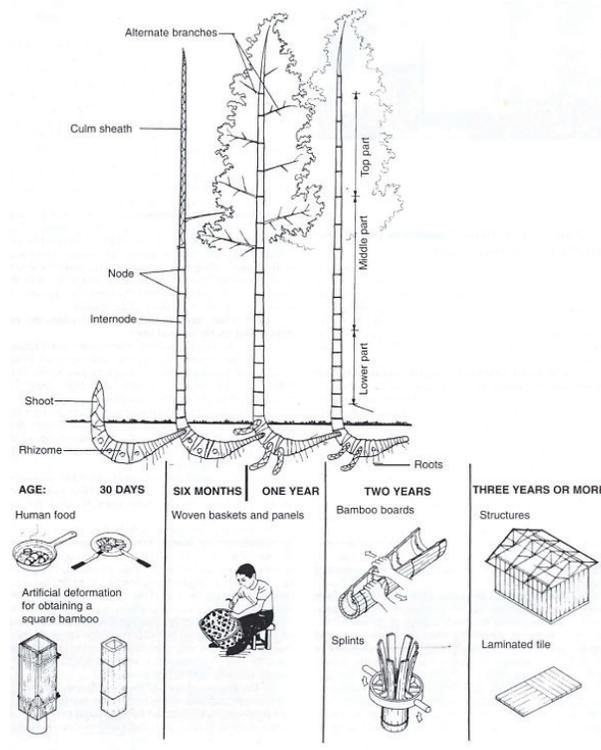


Figura 1. Partes y usos del bambú dependiendo de su edad. Fuente: [4].

El género *Otatea* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Guaduiniae), cuenta con 11 especies en el territorio mexicano de las cuales sólo dos de ellas viven en el bosque mesófilo de montaña, el resto lo hace en la selva baja y hasta en matorrales xerófilos; crece desde los 10 hasta los 2 100 m de altitud [1].

Dentro de este género se encuentra *Otatea Fimbriata Soderstr.*, que nace de forma natural en altitudes que van de entre los 1,000 a los 1,300 m.s.n.m, con las longitudes de varas (culmos) que van de los 2.5 – 6 u 8 m, con diámetros de entre 1 a 6 cm, internudos de 13 a 23 cm de largo, son sólidos cuando son jóvenes y huecos cuando viejos, paredes interiores de 2-7mm de espesor, tres ramas principales en los nudos, con floración monocárpica en ciclos de entre 8 a 20 años [7].

El estado de Chiapas, a pesar de tener diversidad de Bambúes; así como las condiciones óptimas para su crecimiento, estos vienen a ser un recurso natural desaprovechado y subutilizado infiriéndole por desconocimiento, cualidades negativas (poca durabilidad, falta de resistencia, mantenimiento excesivo) que generan y simbolizan desconfianza, incidiendo en el rechazo para su aprovechamiento dentro de la población. Aunado a esto, sistemas constructivos tradicionales donde se emplean estas especies son reemplazados por materiales industrializados matizados bajo condiciones de desarrollo y progreso.

En este sentido, se denotan en la presente investigación las características de la especie nativa *Otatea fimbriata Soderstr.*, sus posibles aplicaciones en la industria de la construcción, además de resaltar las diversas formas para su aprovechamiento pudiendo llegar a incidir de manera directa en el bienestar de la población local.

Materiales y métodos

La presente investigación es de carácter cualitativa y el marco teórico de referencia se estructuró con base en una revisión bibliográfica especializada [8].

La metodología utilizada consistió principalmente en búsqueda sistemática de información bibliográfica proveniente tanto de artículos científicos, tesis y libros de carácter electrónico encontrados en las bases de datos de diferentes repositorios como lo son: Google Scholar, Redalyc, Dialnet y Scielo [9], así como en colecciones científicas de herbarios como CHIP, HEM, y registros de bases de datos en Línea: MEXU [10] y CONABIO [11]. Procurando en todo momento adquirir información precisa, pertinente y relevante.

Resultados

El bambú nativo en Chiapas, está muy bien representado a nivel nacional encontrándose 33 especies, de las 56 reportadas para México [1]. EL Género *Otatea* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Guaduinae), cuenta con 11 especies a nivel nacional [1], 5 de estas especies se localizan en el estado de Chiapas (*Otatea acuminata*, *O. carrilloi*, *O. fimbriata*, *O. glauca*, *O. rzedowskiorum*) [12], de forma particular se encuentra que *Otatea fimbriata* Soderstr., tiene presencia específica en 11 de 124 municipios que comprenden al estado de Chiapas, encontrándose de forma silvestre en: Suchiapa, Chiapa de Corzo, Chicoasén, San Cristóbal de las Casas, San Fernando, Las margaritas, Ixtapa, Zinacantán, San Lucas, Motozintla y Tuxtla Gutiérrez, donde se le ha llegado a conocer de forma local con el nombre de: otate, carrizo y guich. Además, a esta especie se le ha atribuido usos que van desde la elaboración de herramientas, hasta la conformación de sistemas constructivos de muros y cubiertas en la vivienda tradicional chiapaneca [1], [6], [10], [11], [13]–[16].

En lo que respecta a sus cualidades físicas y mecánicas, la especie *Otatea fimbriata* (guich), presenta valores de resistencia máxima a la compresión paralela a la fibra, que van de entre los 40.42 Mpa (412.17 Kg/cm²) a los 49.60 Mpa (505.78 Kg/cm²) en ejemplares con nudo y sin nudo. En flexión paralela a la fibra valores que de 61.51 MPa (627.23 Kg/cm²) a 48.34 MPa (492.93 Kg/cm²). Y finalmente los valores de Resistencia a la Tensión paralela a la fibra en los especímenes con nudo van de 110 Mpa (1121.69 Kg/cm²) a 94.67 Mpa (965.36 Kg/cm²); y de 96.15 Mpa (980.46 Kg/cm²) a 92.86 Mpa (946.91 Kg/cm²) en porciones sin nudo. Presentando Además, una densidad media que va de los 762.96 a los 905.99 Kg/M³ [13], [14].

Dentro de las aplicaciones constructivas atribuidas a la especie se agrupan de la siguiente forma:

Construcción Tradicional

El guich (*Otatea fimbriata*), se ha usado en la composición de muros bajo el sistema constructivo bajareque, además de estar presente en la estructura de cubierta, al cargar las tejas de barro en la tradicional vivienda Chiapaneca [13].

Tecnología constructiva para la vivienda

Vivienda Climáticamente Inteligente, FAUNACH, 2019.

Construcción desarrollada por los alumnos en las Instalaciones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas. En donde se emplearon sistemas constructivos alternativos haciendo uso de los materiales naturales (Tierra y Bambú) para la composición de muros y cubierta. Las varas de *Otatea fimbriata*, se utilizaron para la prefabricación de secciones completas de paneles para su posterior montaje en la cubierta, compuesta a la vez

por un terrado y lámina galvanizada. También se hicieron uso de varas para su colocación en forma vertical (vara por vara) llegando a componer el muro superior a manera de parte soles (Figura 2). Dicha construcción fue galardonada con *Medalla de Plata bajo el nombre de “Aprender Haciendo, Proceso de Construcción de Vivienda Climáticamente Inteligente”*, en la bienal de arquitectura chiapaneca en el año 2019 [17].



Figura 2. Vivienda Climáticamente Inteligente desarrollada por Alumnos de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas, México. A) Elaboración de panel en el piso a base de varas de *Otatea fimbriata* (Guich). B) Paneles para cubierta a base de *Otatea fimbriata*. C) Interior de la vivienda Climáticamente Inteligente. D) Perspectiva exterior de la vivienda donde se aprecian los materiales empleados para su concepción (tierra y bambú) Fuente: [17].

Curso-Taller sobre Construcción de Cubierta con Bambú Guich (Bambú Nativo de Chiapas, México) en la FA UNACH, 2019.

Taller en donde se promovió el uso estructural de la especie de bambú nativo *Otatea fimbriata*, esto debido a la consideración de las características físicas y mecánicas propias de la especie. En dicho taller se llegaron a realizar estructuras ligeras usando amarres tradicionales y anclajes sobre elementos de piedra natural (Figura 3).



Figura 3. Estructuras ligeras desarrolladas en el taller en las instalaciones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas, México. A) Elementos estructurales a base de *Otatea fimbriata* (Guich). B) Interior de estructura ligera.

Modulo Sanitario con cubierta verde hiperbólica, Suchiapa, Chiapas, México, 2021.

Construcción desarrollada con sistemas constructivos tradicionales, empleando como base la Madera, la Tierra y la *Otatea fimbriata* (Guich). Este proyecto se enmarca principalmente para reivindicar los materiales naturales mediante su empleo en sistemas constructivos alternativos, además de hacer uso del sistema de techo verde promovido y aplicado por el cuerpo académico Cocovi (Componentes y Condicionantes para la Vivienda) de la Facultad de Arquitectura de la UNACH (Figura 4). El uso de *Otatea fimbriata* se ve reflejado en el armado de muros bajo el sistema constructivo bajareque reforzado, además de emplear las varas (culmos) de forma horizontal para la estructuración de la cubierta.



Figura 4. Módulo Sanitario con cubierta verde hiperbólica en el que se emplean materiales regionales para erigir los componentes estructurales de muros y cubierta. A) Culmos de *Otatea fimbriata* Soderstr. (Guich). B) y C) Estructura de muros y cubierta a base de madera y *Otatea fimbriata*. D) Módulo sanitario donde se identifica la composición de los muros a base de tierra. E) Elementos horizontales de Guich en la composición estructural de la cubierta. F) Cubierta verde sobre la estructura del baño.

Prototipos de Estructuras Ligeras_2019

Elementos estructurales prefabricados desarrollados en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas, donde se exploraron las posibilidades constructivas para el empleo de varas de *Otatea fimbriata* en la composición de elementos prefabricados, modulares y desplegables (Figura 5).



Figura 5. Prefabricación de elementos constructivos a base de *Oatea fimbriata*. A) y B) Estructura plegable para la generación de espacios de resguardo, de fácil manipulación y montaje. C) Viga compuesta. D) Puente autoportante.

Otras aplicaciones asociadas a la especie.

Debido a las propiedades físicas y mecánicas presentes en los culmos de bambú, se llegan a utilizar en la composición de marcos de bicicletas, garantizando su alto desempeño, eficiencia y durabilidad, tal como los elaborados por la empresa Jaguar Cycles en San Cristobal de las Casas, Chiapas, México (Figura 6).



Figura 6. Figura 6. Bicicleta desarrollada por Jaguar Cycles, en donde hacen uso de bambúes nativos como la *Guadua amplexifolia* y *Oatea fimbriata* en la composición estructural del Marco.

Discusión

Otatea Fimbriata Soderstr., es una especie con un amplio potencial, que presenta características físicas y mecánicas, que igualan e incluso superan a especies nativas de México del género *Guadua* (*Guadua aculeata*, *G. amplexifolia*, *G. velutina*, *G. paniculata*) [13]. Esto es de vital importancia para la confiabilidad en su empleo y aprovechamiento en la conformación tanto de sistemas estructurales, como los reflejados en la presente investigación, así como para el desarrollo de nuevas alternativas constructivas para la concepción de espacios habitables.

En cuanto a las aplicaciones registradas para la especie, se asemejan a lo reportado por Rodríguez et. al. 2010, en su investigación dentro del territorio mexicano, atribuyéndole a *Otatea Fimbriata* usos que van desde la cestería, construcción, forraje, herramientas de trabajo, muebles, hasta los objetos de uso personal, empleando para esto partes de la planta como el culmo, ramas y hojas. Siendo considerada como una de las especies más utilizadas y más rentables de México.

Todo esto hace pensar en las infinitas posibilidades a desarrollar con esta especie en particular, impactando de forma positiva en la sociedad y el medio ambiente con el correcto aprovechamiento del Bosque silvestre.

Conclusiones y/o recomendaciones

El Bambú nativo *Otatea Fimbriata Soderstr.*, viene a jugar un papel importante por ser un recurso natural con características de fuerza y resistencia, que lo dotan de un amplio potencial para ser empleado desde la conformación de espacios habitables hasta su aprovechamiento de distintas maneras localmente (herramientas, objetos, componentes estructurales), generando, además diversidad de productos que, integrados a la cadena de valor respectiva, detonarían la economía local.

Es oportuno mencionar, que, en cuanto a la aplicación de tecnologías constructivas, se requieren desarrollar sistemas constructivos en su conjunto, así como componentes para la construcción, lo que abre un campo de investigación muy amplio. Además de trabajar y promover de forma integral el aprovechamiento silvicultural, llegando a garantizar la salud del bosque silvestre, así como la calidad de las varas y productos derivados mediante tratamientos específicos que garanticen la vida útil del material, de tal forma que se llegue a estructurar y establecer de forma activa la cadena de valor productiva de la especie.

Agradecimientos

La investigación se llevó a cabo gracias al apoyo y colaboración del Pronace de Vivienda y Hábitat Sustentable, al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentable (LVCS), y al cuerpo académico COCOVI (Componentes y Condicionantes de la Vivienda) de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas, México.

Referencias

- [1] E. Ruiz-Sanchez, "Los bambúes de México: diversidad, conservación y uso," *Biodiversitas*, vol. 143, pp. 13–16, 2019.
- [2] E. Ruiz-Sanchez, L. G. Clark, X. Londoño, T. Mejía-Saulés, and G. C. Rodríguez, "Morphological keys to the genera and species of bamboos (Poaceae: Bambusoideae) of Mexico," *Phytotaxa*, vol. 236, no. 1, pp. 1–24, 2015, doi: 10.11646/phytotaxa.236.1.1.
- [3] E. Ruiz-Sanchez et al., "Diversity, distribution, and classification of Neotropical woody bamboos (Poaceae: Bambusoideae) in the 21st Century," *Bot. Sci.*, vol. 99, no. 2, pp. 198–228, Feb. 2021, doi: 10.17129/BOTSCI.2722.

- [4] O. Hidalgo López, *Bamboo, the Gift of the Gods*. Bogotá, 2003.
- [5] A. Yerania, C. Cuenca, A. León-merino, D. M. Sangerman-jarquín, M. Hernández-juárez, and M. Cristina, "Socioeconomic aspects of the use of bamboo in a rural community of Veracruz , Mexico Introducción El bambú es una gramínea leñosa gigante , perteneciente a la clase Bambuseae ," *Rev. Mex. Ciencias For.*, vol. 11, no. 62, 2020, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322020000600033&script=sci_arttext.
- [6] R. M. Rodríguez, G. Leopoldo, W. Sánchez, L. M. Gómez, A. E. Zarco. A., and E. Ceccon, "Usos actuales, distribución potencial y etnolingüística del bambú leñoso en México," in *Tradiciones & transformaciones en Etnobotánica*, CYTED-Prog., no. January, P. M. A. MARÍA LELIA POCHETTINOANA H. LADIO, Ed. Argentina, 2010, pp. 355–363.
- [7] E. Ruiz-Sanchez, V. Sosa, M. T. Mejía-Saules, X. Londoño, and L. G. Clark, "A taxonomic revision of *Otatea* (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae) including four new species," *Syst. Bot.*, vol. 36, no. 2, pp. 314–336, 2011, doi: 10.1600/036364411X569516.
- [8] H. R. Sampieri, *Metodología de la Investigación*, Sexta edic. México, 2014.
- [9] M. F. Hernández-Zamora, S. I. Jiménez-Martínez, and J. I. Sánchez-Monge, "Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 34, pp. 3–10, 2021, doi: 10.18845/tm.v34i2.4831.
- [10] MEXU, "IBdata v3 'Helia Bravo Hollis,'" *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología*, 2021. <https://www.ibdata.abaco3.org/web/web-content/admin-queryfilter/queryfilter.php> (accessed Dec. 15, 2021).
- [11] CONABIO, "Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Registros de ejemplares." Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, México., 2021, [Online]. Available: <http://www.snib.mx/>.
- [12] CONABIO, "Otates (*Otatea*)," *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, 2021. <https://enciclovida.mx/especies/140922-otatea> (accessed Dec. 15, 2021).
- [13] H. D. Llaven José, "Potencialidades del bambú nativo en comunidades de suchiapa, chiapas.," Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, 2020.
- [14] H. D. Llaven José, G. Castañeda Nolasco, C. A. Guillén Guillén, and Y. Barnet, "Resistencia a la compresión paralela a la fibra de una especie de bambú nativo de México (*Otatea fimbriata* Soderstrom)," *Acad. XXII*, vol. 10, no. 20, p. 171, 2019, doi: 10.22201/fa.2007252xp.2019.20.72348.
- [15] CONABIO, "Herbario Eizi Matuda HEM de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas." Herbario Faustino Miranda, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 2018, [Online]. Available: <http://www.biodiversidad.gob.mx/fichas-conabio-war/resources/coleccion/1015>.
- [16] INEGI, "Censo de Población y Vivienda," Censo de Población y Vivienda, México, 2020. [Online]. Available: www.cuentame.inegi.org.mx.
- [17] A. Nivon, M. López, L. Jiménez, G. Castañeda Nolasco, J. L. Jiménez, and F. de A. Unach, "Vivienda Climáticamente Inteligente," 2019.

Comparación en altura de planta y producción de brotes entre dos variedades de pitahaya (*Hylocereus* sp.)

Plant height and sprout production comparison between two varieties of pitahaya (*Hylocereus* sp.)

José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 26 de enero, 2022

Fecha de aprobación: 17 de mayo, 2022

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Comparación en altura de planta y producción de brotes entre dos variedades de pitahaya (*Hylocereus* sp.). *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 13-23.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6105>

- 1 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Investigador de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mongeperez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>
- 2 Máster en Administración Educativa, Investigadora de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica.
Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0456-2230>

Palabras clave

Fenología; clima; precipitación pluvial; temperatura; humedad relativa

Resumen

El objetivo fue comparar la altura de la planta y la producción de brotes en pitahaya (*Hylocereus* sp.), y su relación con las variables climáticas, en las variedades San Ignacio y Amarilla. El ensayo se realizó en San Mateo, Alajuela, Costa Rica, de febrero 2017 a diciembre 2019. Las variables evaluadas fueron: altura de planta (AP, en cm), número de brotes vegetativos (NBV), número de brotes reproductivos (NBR), precipitación pluvial (P, en mm), humedad relativa (HR, en %), temperatura promedio (T_p , en °C), temperatura máxima ($T_{máx}$, en °C), y temperatura mínima ($T_{mín}$, en °C). No se presentaron diferencias significativas en AP y NBR entre ambas variedades; sin embargo, NBV fue significativamente mayor para la variedad San Ignacio (0,40), con respecto a la variedad Amarilla (0,20), lo que podría indicar una mejor adaptación de la variedad San Ignacio a las condiciones en que se realizó el ensayo. Los brotes reproductivos se produjeron únicamente durante la estación lluviosa; en 2018 y 2019, la variedad Amarilla presentó dos ciclos principales de floración por año, mientras que la variedad San Ignacio mostró tres ciclos por año.

Keywords

Phenology; climate; rainfall; temperature; relative humidity

Abstract

The objective was to compare plant height and sprout production in pitahaya (*Hylocereus* sp.), and its relationship with climatic variables, in San Ignacio and Amarilla varieties. The trial was conducted in San Mateo, Alajuela, Costa Rica, from February 2017 to December 2019. Tested variables were: plant height (PH, in cm), number of vegetative sprouts (NVS), number of reproductive sprouts (NRS), rainfall (R, in mm), relative humidity (RH, in %), average temperature (T_a , in °C), maximum temperature (T_{max} , in °C), and minimum temperature (T_{min} , in °C). There were no significant differences in PH and NRS between both varieties; however, NVS was significantly higher for San Ignacio variety (0.40) compared to Amarilla variety (0.20), which could indicate a better adaptation of San Ignacio variety to the conditions in which the trial was carried out. The reproductive sprouts occurred only during the rainy season; in 2018 and 2019, Amarilla variety showed two main flowering cycles per year, while San Ignacio variety showed three cycles per year.

Introducción

La pitahaya (*Hylocereus* spp.), género perteneciente a la familia Cactaceae, orden Caryophyllales, incluye varias especies nativas de las zonas tropicales y subtropicales americanas [1] [2] [3].

Los frutos contienen vitaminas, flavonoides, y minerales como potasio, hierro, calcio, fósforo, zinc, sodio y magnesio; también aportan fibra dietética, carbohidratos y antioxidantes; su consumo ayuda a prevenir el cáncer, la diabetes, y las enfermedades cardiovasculares, respiratorias, gastrointestinales y urinarias [4] [5] [3]. Además de los frutos, sus flores y tallos se utilizan por sus propiedades medicinales, tales como efecto hipoglucémico, efecto diurético y agente cicatrizante [1].

Los frutos se consumen como fruta fresca, y también se pueden usar como materia prima para la elaboración de jugos, gelatinas, refrescos, helados, yogurt, dulces, mermeladas, jaleas, cocteles, esencias, y suplementos digestivos [6] [1].

Se conocen alrededor de 14 especies de este género, y las que más se cultivan a nivel mundial son: *H. costaricensis*, *H. megalanthus*, *H. monacanthus*, y *H. undatus* [5] [1].

Entre las variedades de *Hylocereus* sp. que se cultivan con más frecuencia en Costa Rica y Nicaragua están: “Rosa”, “Cebra”, “Orejona”, “San Ignacio”, “Nacional”, “Crespa” y “Lisa”, todas ellas de cáscara roja y pulpa roja; además, también se encuentra la variedad “Amarilla”, de cáscara amarilla y pulpa blanca, que corresponde a *H. undatus* subsp. *luteocarpa* [1] [7] [8] [9].

La pitahaya se encuentra en varios ecosistemas que van desde el nivel del mar hasta 1840 msnm, con un régimen de lluvias entre 350 a más de 2000 mm, y con un rango de temperaturas extremas entre 11 y 40 °C [10]. Sin embargo, aunque la pitahaya puede sobrevivir en climas muy calientes y secos, con temperaturas de más de 38-40 °C [1] [5], las temperaturas promedio superiores a 37-38 °C causan daño en los tejidos del tallo y la muerte de la planta, y la mejor adaptación se da con temperaturas promedio de 21 a 29 °C [10].

La estación lluviosa brinda las condiciones óptimas para la fotosíntesis de la pitahaya, debido a la menor temperatura del aire y al menor déficit de presión de vapor durante la noche [1].

Las yemas florales de la pitahaya pueden permanecer en estado latente por varias semanas, y el inicio de la floración sucede generalmente después del inicio de la temporada lluviosa; en el hemisferio norte, la floración sucede de mayo a octubre [1] [11] [12] [13] [10] [3] [9].

En varios estudios se ha informado que existe una alta variabilidad en el número de flores por planta entre genotipos de pitahaya (desde 5,0 hasta 55,3) [10], así como entre sitios de producción [14].

Los eventos fenológicos, como la floración o la brotación vegetativa, son influenciados directamente por los factores climáticos, tales como humedad relativa, lluvia y temperatura, debido al efecto de estas variables sobre la fisiología y metabolismo de las plantas [15]. La información sobre las fases fenológicas es importante para evaluar el impacto de los factores climáticos sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo, pues la fenología es un indicador clave del cambio climático [16]. El estudio sobre la fenología vegetativa y reproductiva de una especie a través del tiempo brinda elementos importantes para establecer estrategias de conservación, fitomejoramiento y manejo de los cultivos [15] [16].

El objetivo de este trabajo fue comparar la altura de la planta y la producción de brotes, y su relación con las variables climáticas, en dos variedades de pitahaya en Costa Rica.

Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en Higuito de San Mateo, Alajuela, Costa Rica, en una parcela de pitahaya (*Hylocereus* sp.), cultivada en forma orgánica, de las variedades “San Ignacio” y “Amarilla”, ubicada a 9° 56' 36,880" de Latitud Norte y 84° 32' 57,148" de Longitud Oeste, y a una altitud de 232 msnm. La fecha de siembra de la plantación fue el 1° de junio de 2016, a partir de plantas reproducidas vegetativamente mediante esquejes; la distancia de siembra fue de 3 x 3 m. Para el crecimiento de las plantas se utilizó como tutores, postes vivos de jiñocuabe (*Bursera simaruba*), los que brindaron sombra al cultivo, y cuyas ramas fueron podadas cuando el nivel de sombra era excesivo.

En el cuadro 1 se describen las principales características del suelo. El análisis se realizó en el mes de abril de 2018. Se presenta un suelo arcilloso, con una CICE alta, y en el que la principal limitante es un contenido bajo de P.

La fertilización de la parcela consistió en la aplicación de bocashi, a una dosis de 1,5 kg/planta/año, fraccionada en tres aplicaciones a lo largo del año (junio, agosto y octubre), de 500 g cada una.

Se seleccionaron al azar 10 plantas de pitahaya de cada una de las variedades estudiadas, en las cuales se realizaron las observaciones. Se hicieron visitas a la parcela cada dos semanas, con el fin de evaluar las siguientes variables:

1. Altura de la planta (AP, en cm): se registró el dato para cada planta en forma aproximadamente semestral (cada 5-7 meses, excepto la última, que se hizo casi a 4 meses luego de la penúltima), y se obtuvo el promedio. Las fechas en que se realizó esta evaluación fueron: 8 febrero y 26 julio de 2017; 23 febrero y 22 agosto de 2018; y 5 marzo, 3 setiembre y 26 diciembre de 2019.
2. Número de brotes vegetativos (NBV) nuevos por planta: se registró el dato para cada planta en forma quincenal, y se obtuvo el promedio.
3. Número de brotes reproductivos (NBR) nuevos por planta: se registró el dato para cada planta en forma quincenal, y se obtuvo el promedio.

Para la contabilización de los brotes vegetativos, se incluyó aquellos que correspondieran con los estados de crecimiento fenológico 011, 013, 015, 017, 019 y 310, y para los brotes reproductivos se registró los que se encontraban en los estados de crecimiento fenológico 510, 511, 513 y 514 y 515, en ambos casos según la escala BBCH desarrollada para pitahaya [16]. De esta forma se aseguró que no existiera un doble registro, ni tampoco un subregistro, de los brotes nuevos entre una evaluación y la siguiente, pues se comprobó que en el intervalo de dos semanas se registraban exactamente los brotes nuevos emergidos en ese lapso de tiempo. Las evaluaciones de los brotes iniciaron el 8 de febrero de 2017, y finalizaron el 26 de diciembre de 2019.

Además, se obtuvieron los datos diarios de las siguientes variables climáticas en San Mateo para los años 2017-2019, los que fueron proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN): a) Precipitación pluvial (P, en mm); b) Humedad relativa (HR, en %); c) Temperatura promedio (T_p , en °C); d) Temperatura mínima (T_{min} , en °C); y e) Temperatura máxima ($T_{máx}$, en °C).

Se elaboraron gráficos descriptivos y comparativos de las diversas variables evaluadas en ambas variedades. Para la comparación estadística de todas las variables entre las dos variedades de pitahaya, se utilizó la prueba de t de Student, con una significancia del 5% (bilateral).

Cuadro 1. Características físicas, químicas y microbiológicas del suelo de la parcela de pitahaya en San Mateo, Alajuela.

Características	Valor	Valor de referencia
Físicas		
Arena (%)	22	nd
Limo (%)	23	nd
Arcilla (%)	55	nd
Clase textural	Arcilloso	nd
Químicas		
pH (H ₂ O)	5,9	5,5
Acidez (cmol(+)/L)	0,12	0,5
Ca (cmol(+)/L)	10,37	4
Mg (cmol(+)/L)	2,14	1
K (cmol(+)/L)	0,86	0,2
CICE (cmol(+)/L)	13,49	5
SA (%)	0,9	nd
P (mg/L)	4	10
Zn (mg/L)	6,9	3
Cu (mg/L)	20	1
Fe (mg/L)	91	10
Mn (mg/L)	27	5
CE (mS/cm)	0,3	1,5
C (%)	4,65	nd
N (%)	0,44	nd
Relación C/N	10,6	nd
S (mg/L)	17	12
MO (%)	6,65	nd
Microbiológicas		
Hongos (UFC/g)	9,9 x 10 ⁴	nd
Hongos dominantes	<i>Penicillium sp.</i> , <i>Trichoderma sp.</i> , <i>Aspergillus sp.</i> , <i>Fusarium sp.</i>	nd

Nota: El valor de referencia corresponde al definido como crítico por parte del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. CICE: capacidad de intercambio de cationes efectiva = Acidez+Ca+Mg+K; SA: porcentaje de saturación de acidez = (Acidez/CICE)*100; CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; nd: no dato.

Resultados y discusión

En el cuadro 2 se muestran los valores de las variables climáticas, durante el período de ejecución del proyecto.

Cuadro 2. Valores de variables climáticas en San Mateo.

Variable	Promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana
P (mm)	6,16	0	168	0,10
HR (%)	82,43	37	100	89
T _{máx} (°C)	33,21	24,0	39,4	32,8
T _p (°C)	25,59	21,8	30,0	25,3
T _{mín} (°C)	20,39	15,2	26,4	20,7

Nota: Los datos se calcularon a partir de los valores diarios de las variables climáticas en San Mateo (8 febrero 2017 a 26 diciembre 2019).

Unos investigadores informaron que la fijación neta de CO₂ en pitahaya es óptima cuando la temperatura diurna y nocturna es de 30 y 20 °C, respectivamente, en comparación a temperaturas mayores o menores [7] [17]; las condiciones de T_p que se presentaron durante este ensayo se ubicaron en ese rango, y lo mismo ocurrió con la T_{mín} promedio, pero la T_{máx} promedio fue superior a dicho rango.

Con respecto a la relación entre temperatura y floración en pitahaya, unos investigadores encontraron que un rango de temperatura entre 34-38 °C redujo en forma importante la floración [14]; en el presente ensayo, durante los meses secos la T_{máx} alcanzó valores superiores a 35 °C, aunque la T_p nunca superó los 30 °C.

En la figura 1 se presentan los datos de altura de la planta de pitahaya, a través del tiempo, para las variedades evaluadas. La altura de la planta a partir de enero 2018 se ubicó entre 1,50 y 1,80 metros para ambas variedades, lo cual estuvo condicionado por la altura de los tutores sobre los que creció la planta, así como por las labores de poda de mantenimiento que se realizaron en la plantación. No se presentaron diferencias significativas en la altura de la planta entre ambas variedades, según la prueba de t de Student ($p \leq 0,05$), para ninguna de las fechas de evaluación.

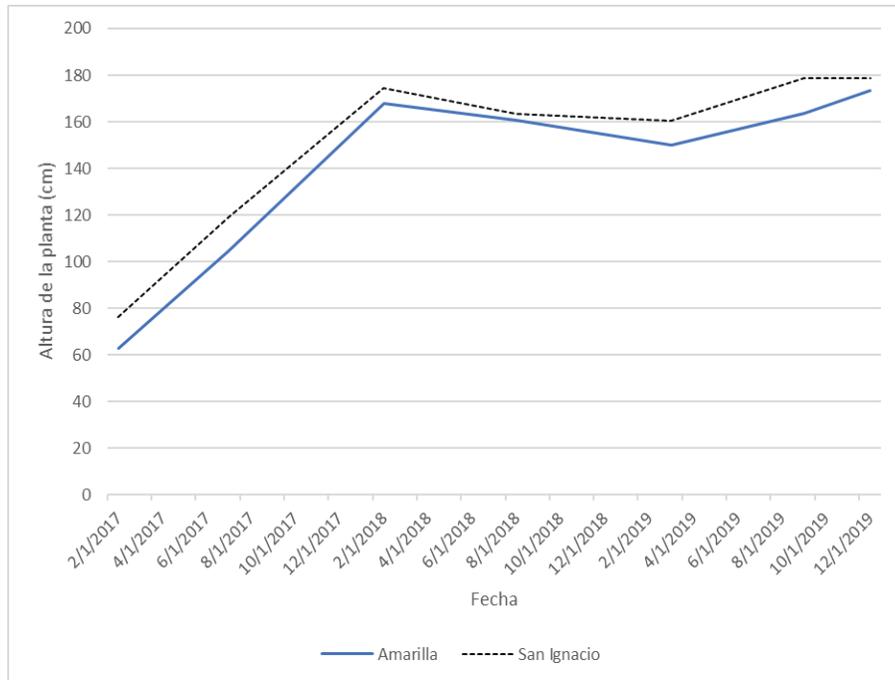


Figura 1. Comparación de la altura de la planta de pitahaya, según la edad después de siembra, para las dos variedades (8 febrero 2017 a 26 diciembre 2019). Nota: Valor promedio de 10 plantas, para cada variedad.

Con respecto a la producción de brotes vegetativos, la emisión de este tipo de brote fue significativamente mayor en la variedad San Ignacio que en la variedad Amarilla, a lo largo del período evaluado (figura 2); la diferencia en el NBV entre ambas variedades fue altamente significativa ($p \leq 0,01$). Este resultado podría indicar una mejor adaptación de la variedad San Ignacio a las condiciones en que se realizó el ensayo.

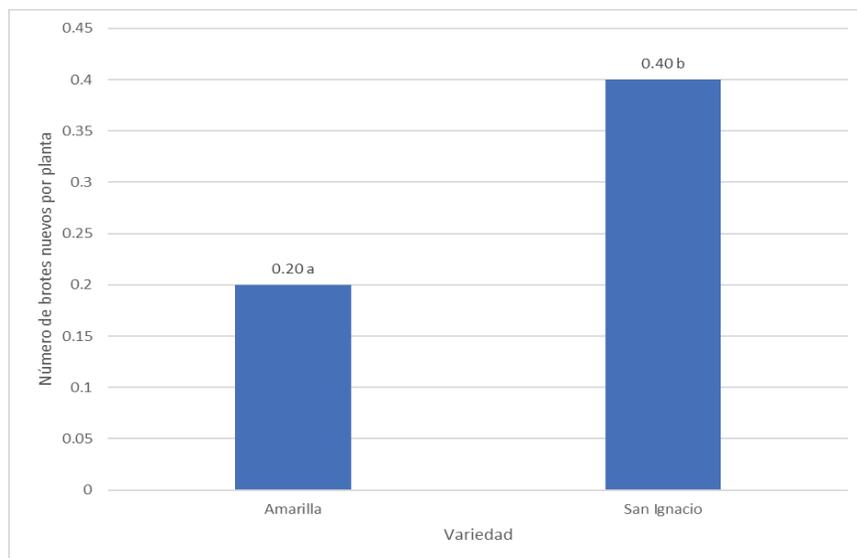


Figura 2. Número promedio de brotes vegetativos nuevos por quincena (8 febrero 2017 a 26 diciembre 2019) para ambas variedades. Nota: Promedio de 10 plantas por variedad. Los valores que comparten la misma letra no son estadísticamente diferentes, según prueba de t de Student ($p \leq 0,05$).

En la figura 3 se presenta la evolución de la producción de brotes vegetativos durante el desarrollo del ensayo. Se presentaron algunas similitudes entre ambas variedades, como alta producción de NBV en abril y julio de 2017; febrero-marzo de 2018; y noviembre-diciembre de 2019; así como una nula producción de NBV en junio-julio de 2018. Sin embargo, en otros momentos este comportamiento fue totalmente diferente entre ambas variedades: setiembre-noviembre de 2017; enero, setiembre y noviembre de 2018; y enero-mayo y setiembre de 2019; en la mayor parte de esos meses, el NBV fue superior en la variedad San Ignacio que en la variedad Amarilla.

Algunos autores han informado que en el cultivo de pitahaya se producen múltiples eventos de brotación vegetativa a lo largo del año [16] [18]; esto mismo sucedió en el presente estudio.

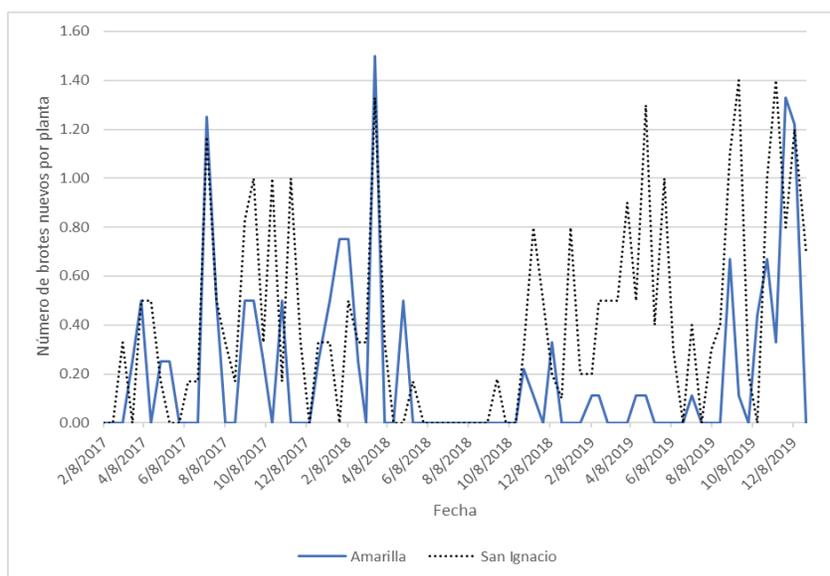


Figura 3. Evolución de la producción quincenal promedio de brotes vegetativos (NBV) nuevos por planta en pitahaya, variedades Amarilla y San Ignacio (8 febrero 2017 a 26 diciembre 2019). Nota: Promedio de 10 plantas por variedad.

La producción de brotes reproductivos fue similar en ambas localidades a lo largo del período de evaluación, y no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ambas variedades (figura 4).

En la figura 5 se compara la producción de brotes reproductivos en ambas variedades. En 2017, solamente se produjeron brotes reproductivos en la variedad San Ignacio, aunque en muy poca cantidad. En los años 2018 y 2019, la emisión de NBR se dio exactamente en las mismas fechas, aunque con diferentes intensidades según la variedad; la Amarilla presentó dos picos principales de producción de NBR en ambos años, mientras que la variedad San Ignacio mostró tres picos en ambos períodos. Además, en agosto-setiembre de los años 2018 y 2019, solamente la variedad San Ignacio presentó un alto NBR, mientras que la variedad Amarilla mostró una muy pequeña producción de ese tipo de brotes en esos meses.

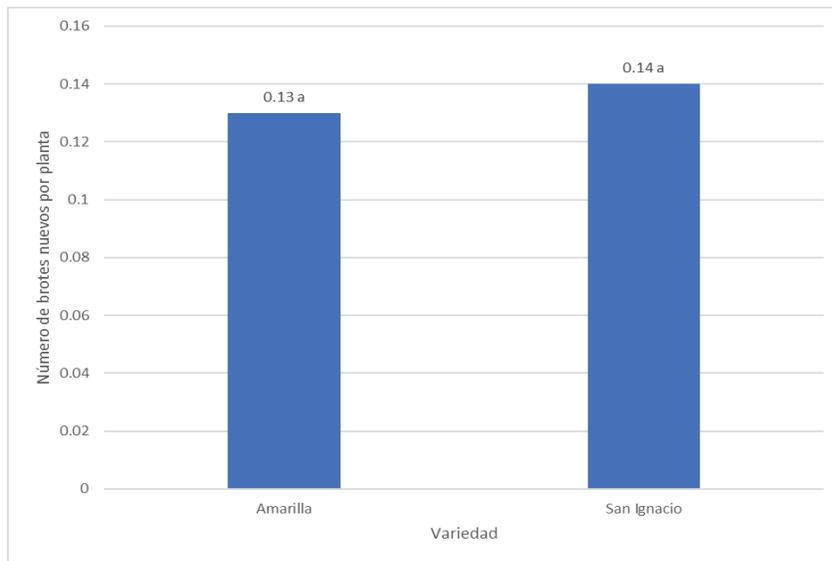


Figura 4. Número promedio de brotes reproductivos nuevos por quincena (8 febrero 2017 a 26 diciembre 2019) para ambas variedades. Nota: Promedio de 10 plantas por variedad. Los valores que comparten la misma letra no son estadísticamente diferentes, según prueba de t de Student ($p \leq 0,05$).

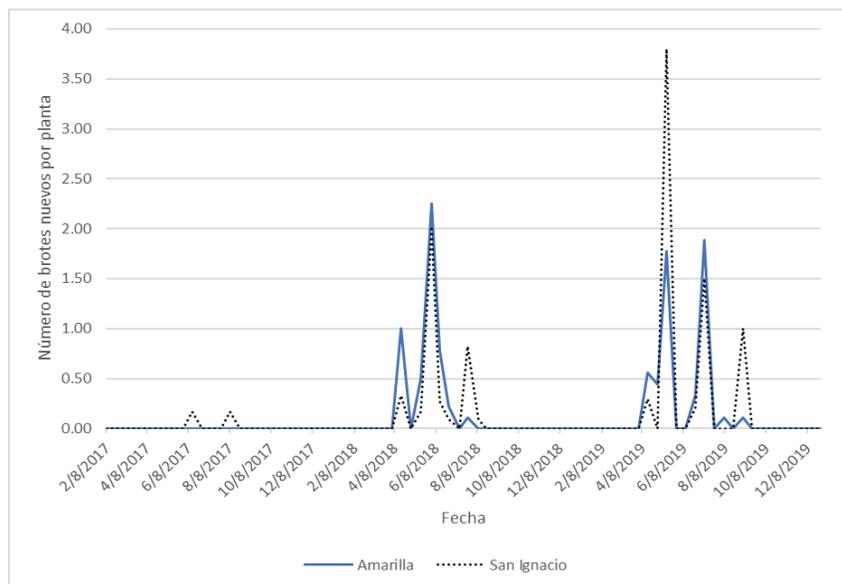


Figura 5. Evolución de la producción quincenal promedio de brotes reproductivos (NBR) nuevos por planta en pitahaya, variedades Amarilla y San Ignacio (8 febrero 2017 a 26 diciembre 2019). Nota: Promedio de 10 plantas por variedad.

Para ambas variedades, los brotes reproductivos se emitieron únicamente durante la temporada lluviosa. Otros autores informaron también que el inicio de la floración ocurrió luego del inicio de la estación lluviosa [13] [16] [19] [3] [12] [11].

En forma similar a lo hallado en el presente trabajo, otros autores obtuvieron entre 3-5 ciclos de floración por año [16] [20] [21] [14], mientras que otros investigadores hallaron entre 5 y 9 ciclos por año [3] [13] [19]. En una prueba con 30 genotipos de pitahaya realizada en Taiwan,

el número de ciclos de floración varió entre 3 y 6 por año, según el genotipo [22], mientras que otro investigador informó que los clones de pitahaya varían entre 2 y 10 ciclos de floración al año [7].

Conclusiones

No se presentaron diferencias significativas en AP y NBR entre ambas variedades; sin embargo, NBV fue significativamente mayor para la variedad San Ignacio (0,40), con respecto a la variedad Amarilla (0,20), lo que podría indicar una mejor adaptación de la variedad San Ignacio a las condiciones en que se realizó el ensayo.

Los brotes reproductivos se produjeron únicamente durante la estación lluviosa; en 2018 y 2019, la variedad Amarilla presentó dos ciclos principales de floración por año, mientras que la variedad San Ignacio mostró tres ciclos por año.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Carlos Blanco y Patricia Oreamuno en el trabajo de campo, y de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés. Asimismo, agradecen la cesión de los datos meteorológicos por parte del Instituto Meteorológico Nacional, y el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] F. Le Bellec and F. Vaillant, "Pitahaya (pitaya) (*Hylocereus* spp.)," in *Postharvest biology and technology of tropical and subtropical fruits*, Woodhead Publishing Limited, 2011, pp. 247-273.
- [2] J. A. Montesinos, L. Rodríguez-Larramendi, R. Ortiz-Pérez, M. A. Fonseca-Flores, G. Ruíz and F. Guevara-Hernández, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano," *Cultivos Tropicales*, vol. 36, no. especial, pp. 67-76, 2015.
- [3] A. L. Ángel, C. A. Estrada, A. Rebolledo and R. Zetina, Pitahayas: patrimonio biocultural para diversificar la agricultura y la alimentación, Veracruz, México: Campo Experimental Cotaxtla, Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2012, p. 184.
- [4] T. A. Ortiz and L. S. A. Takahashi, "Pitaya fruit quality (*Hylocereus undatus* [Haworth] Britton & Rose) according to physiological maturity. A review," *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 14, no. 1, pp. 63-75, 2020.
- [5] K. Abirami, S. Swain, V. Baskaran, K. Venkatesan, K. Sakthivel and N. Bommayasamy, "Distinguishing three Dragon fruit (*Hylocereus* spp.) species grown in Andaman and Nicobar Islands of India using morphological, biochemical and molecular traits," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 2894, 2021.
- [6] L. Huachi, E. Yugsi, M. F. Paredes, D. Coronel, K. Verdugo and P. Coba, "Desarrollo de la pitahaya (*Cereus* sp.) en Ecuador," *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 22, no. 2, pp. 50-58, 2015.
- [7] Y. Mizrahi, "Vine-cacti pitayas - the new crops of the world," *Revista Brasileira de Fruticultura*, vol. 36, no. 1, pp. 124-138, 2014.
- [8] INTA, Cultivo de la pitahaya, vol. Guía tecnológica 6, Managua, Nicaragua: Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria, 2002, p. 38.
- [9] M. E. García and O. Quirós, "Análisis del comportamiento de mercado de la pitahaya (*Hylocereus undatus*) en Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 23, no. 2, pp. 14-24, 2010.
- [10] Y. D. Ortiz-Hernández and J. A. Carrillo-Salazar, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a short review," *Comunicata Scientiae*, vol. 3, no. 4, pp. 220-237, 2012.
- [11] V. B. Marques, J. D. Ramos, N. A. Araújo and R. A. Moreira, "Correlação dos fatores ambientais e o período reprodutivo da pitáia (*Hylocereus undatus*) em Lavras-MG," in *XXI Congresso Brasileiro de Fruticultura*, Natal, RN, Brasil, 2010.
- [12] F. Le Bellec, F. Vaillant and E. Imbert, "Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a new fruit crop, a market with a future," *Fruits*, vol. 61, no. 4, pp. 237-250, 2006.

- [13] T. Osuna-Enciso, J. B. Valdez-Torres, J. A. Sañudo-Barajas, M. D. Muy-Rangel, S. Hernández-Verdugo, M. Villarreal-Romero and J. M. Osuna-Rodríguez, "Fenología reproductiva, rendimiento y calidad del fruto de pitahaya (*Hylocereus undatus* (How.) Britton and Rose) en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México," *Agrociencia*, vol. 50, no. 1, pp. 61-78, 2016.
- [14] A. Nerd, Y. Sitrit, R. A. Kaushik and Y. Mizrahi, "High summer temperatures inhibit flowering in vine pitaya crops (*Hylocereus* spp.)," *Scientia Horticulturae*, vol. 96, no. 1-4, pp. 343-350, 2002.
- [15] K. P. T. Chagas, B. L. B. Carvalho, C. A. G. Guerra, R. A. R. Silva and F. A. Vieira, "Fenologia do dendezeiro e correlações com variáveis climáticas," *Ciência Florestal*, vol. 29, no. 4, pp. 1701-1711, 2019.
- [16] K. Kishore, "Phenological growth stages of dragon fruit (*Hylocereus undatus*) according to the extended BBCH-scale," *Scientia Horticulturae*, vol. 213, pp. 294-302, 2016.
- [17] P. S. Nobel and E. De la Barrera, "High temperatures and net CO₂ uptake, growth, and stem damage for the hemiepiphytic cactus *Hylocereus undatus*," *Biotropica*, vol. 34, no. 2, pp. 225-231, 2002.
- [18] A. Trivellini, M. Lucchesini, A. Ferrante, D. Massa, M. Orlando, L. Incrocci and A. Mensuali-Sodi, "Pitaya, an attractive alternative crop for Mediterranean region," *Agronomy*, vol. 10, p. 1065, 2020.
- [19] A. C. C. Silva, L. L. Cavallari, R. R. Sabião and A. B. G. Martins, "Fenologia reproductiva de pitaya vermelha em Jaboticabal, SP," *Ciência Rural*, vol. 45, no. 4, pp. 585-590, 2015.
- [20] V. B. Marques, R. A. Moreira, J. D. Ramos, N. A. Araújo and F. O. R. Silva, "Fenologia reproductiva de pitaya vermelha no município de Lavras, MG," *Ciência Rural*, vol. 41, no. 6, pp. 984-987, 2011.
- [21] E. R. Martínez-Ruiz, L. Tijerina-Chávez, A. E. Becerril-Román, A. Rebolledo-Martínez, C. Velasco-Cruz and A. L. Ángel-Pérez, "Fenología y constante térmica de la pitahaya (*Hylocereus undatus* Haw. Britt. & Rose)," *Agro Productividad*, vol. 10, no. 9, pp. 3-8, 2017.
- [22] T. D. Ha, L. T. K. Oanh and C. Yen, "Flowering phenology and mating system of a red skin pitaya (*Hylocereus* spp.) germplasm collection in Taiwan," *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, vol. 7, no. 3, pp. 1-8, 2018.

Calibración de equipos de laboratorio en entornos universitarios: estrechando la brecha en materia de gestión metrológica

Calibration of laboratory equipment in university environments: narrowing the gap in terms of metrological management

Manfred Murrell-Blanco¹, Ernesto Montero-Sánchez², Sherryl Campos-Morales³, Ligia Bermúdez-Hidalgo⁴, Karla Vetrani-Chavarría⁵

Fecha de recepción: 21 de julio, 2022

Fecha de aprobación: 18 de octubre, 2022

Calibración de equipos de laboratorio en entornos universitarios: estrechando la brecha en materia de gestión metrológica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 24-33.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6316>

- 1 Académico de la Universidad Nacional. Costa Rica.
Correo electrónico: manfred.murrell.blanco@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7229-1981>
- 2 Académico de la Universidad Nacional. Costa Rica.
Correo electrónico: ernesto.montero.sanchez@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9961-6184>
- 3 Académica de la Universidad Nacional. Costa Rica.
Correo electrónico: sherryl.campos.morales@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3852-9490>
- 4 Académica de la Universidad Nacional. Costa Rica.
Correo electrónico: ligia.bermudez.hidalgo@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0124-9542-3214>
- 5 Académica de la Universidad Nacional. Costa Rica.
Correo electrónico: karla.vetrani.chavarria@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7257-931X>

Palabras clave

Calibración; equipo e instrumentos de laboratorio; gestión metrológica, medición; personal de laboratorio.

Resumen

En los laboratorios universitarios se generan datos que nutren las actividades de investigación y docencia; además, brindan soporte a diferentes sectores productivos y en algunos casos suministran información para la toma de decisiones con alcance legal. Por lo tanto, es necesario asegurar la calidad de sus resultados mediante la implementación de acciones tendientes al mejoramiento de sus mediciones; este sentido, el objetivo de este estudio fue desarrollar una estrategia para la calibración de equipos y cristalería de laboratorio de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) con el fin de disminuir la brecha en materia de gestión metrológica. Entre los hallazgos más relevantes están que los laboratorios universitarios cuentan con poco o nulo presupuesto para la gestión metrológica de sus mediciones, lo que dificulta atender requerimientos como la calibración de equipos y la capacitación de personal. Además, dependen administrativamente de otras instancias universitarias como escuelas e institutos, lo que limita su capacidad de respuesta en materia de oferta de servicios a usuarios externos. En el caso específico de la UNA, se han realizado inversiones importantes en equipamiento y capacitación de personal. Sin embargo, no se han logrado abarcar todas las necesidades de trazabilidad de los laboratorios, lo que impide la completa gestión de la calidad de los resultados. Este estudio ha identificado mecanismos para que los laboratorios cuenten con mediciones trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), aumentando la confianza en sus resultados, permitiendo la detección de problemas e inclusive disminuyendo la presión económica por el rubro de calibraciones.

Keywords

Calibration; laboratory equipment and instruments; metrological management laboratory staff.

Abstract

In university laboratories, data is generated that feeds research and teaching activities. In addition, they support different productive sectors and, in some cases, provide information for decision-making with legal scope. Therefore, it is necessary to ensure the quality of its results by implementing actions to improve measures. In this sense, the objective of this study was to develop a strategy for calibrating laboratory equipment and glassware at the National University of Costa Rica (UNA) to reduce the gap in metrological management. Among the most relevant results are that university laboratories have little or no budget for their measurements' metrological management, making it challenging to meet needs such as equipment calibration and staff training. In addition, it depends administratively on other university entities such as schools and institutes, which limits its response capacity in terms of offering services to external users. In the case of the UNA, significant investments have been made in equipment and personnel training. However, not all traceability needs have been covered, which prevents the complete management of the quality of the results. This study has identified mechanisms for laboratories to have traceability to the International System of Units (SI), increasing confidence in their results, improving the detection of problems, and even reducing economic pressure on the calibration item.

Introducción

Las universidades son instituciones de educación superior que interactúan en forma directa con la sociedad [1]. Esta relación se materializa a través de la formación de profesionales, la producción de conocimiento, el desarrollo de innovaciones destinadas a mejorar la calidad de vida de la población y también mediante la ejecución de proyectos de investigación y desarrollo (I+D) dirigidos a los diferentes sectores productivos [2] [3]. Además, las actividades destinadas a la obtención de resultados (mediante procedimientos de calibración, ensayo, desarrollo de nuevos protocolos, entre otros) son parte fundamental de esas interacciones [4].

En este sentido, la existencia de laboratorios dentro de las universidades ha demostrado ser un elemento fundamental para sustentar la relación universidad, empresa y sociedad. Al respecto [6] señalan que los usuarios internos de estos laboratorios son los estudiantes, profesores e investigadores; mientras que los externos son instituciones estatales, municipalidades, organizaciones privadas, miembros de las comunidades y otras organizaciones que desarrollan programas y proyectos con impacto socio-económico.

Según [7], más de la mitad de los laboratorios universitarios realizan actividades distintas a la docencia e investigación, tales como consultorías, talleres y capacitación sobre temas de su competencia. En este sentido, [8] mencionan que la globalización ha cambiado el paradigma de la educación superior, y que lo que originalmente se realizaba dentro de un solo país, pasó a ser una competencia en el ámbito mundial. Por lo tanto, las universidades y en especial sus laboratorios están obligados a mejorar la calidad de sus resultados y de su oferta de servicios para sobrevivir y competir globalmente.

En la misma línea, [5] [9] indican que los laboratorios que brindan servicios a organizaciones externas deben implementar procedimientos de ensayo y calibración en el marco de buenas prácticas y de normas internacionales que aseguren la obtención de datos confiables para la satisfacción de las necesidades de los clientes.

Sobre este participar, es importante mencionar que los sistemas de gestión de las mediciones forman parte de las estrategias para el logro de mejores resultados [10], y lo que buscan es garantizar el buen funcionamiento de los equipos requeridos por el área específica, atendiendo los requisitos legales vigentes por medio de actividades de mantenimiento preventivo, correctivo y la calibración de equipos.

Al respecto, [11] [12] [13] [14] [15] concluyen que son varios los beneficios que se pueden obtener al incorporar estas prácticas en los laboratorios; por ejemplo: la capacidad de producir resultados consistentes, una mejor gestión de los recursos, la capacidad de demostrar que se han seguido los requisitos técnicos, y una mayor competitividad en el mercado mediante una mejor consistencia de los productos, servicios y procesos.

Sin embargo, en el caso de los laboratorios universitarios, la implementación de estos sistemas es más compleja, ya que éstos están enfocados en varias actividades prioritarias que compiten entre sí, tal es el caso de la investigación y la docencia [1] [3]. Además, [16] mencionan que existe una delegación poco clara de funciones y responsabilidades, alta rotación de personal, falta de recursos económicos y de experiencia sobre los procedimientos para lograr una adecuada gestión metrológica. Sobre las restricciones financieras, [17] indica que esto deriva del alto costo de calibrar los equipos, cumplir con las condiciones ambientales, capacitar al personal, entre otros.

Por su parte, [7] reportan una serie de acciones que han sido poco estudiadas y que los laboratorios utilizan para enfrentar los problemas financieros relacionados con la implementación de sistemas para la mejora de la calidad. Entre estas actuaciones están: la utilización de recursos propios, el financiamiento mediante proyectos de investigación, extensión u otro tipo de

fuentes, la búsqueda de nuevos clientes y mercados y la oferta de servicios como consultorías y capacitación. En este sentido, varios laboratorios agregan el control, optimización o reubicación de recursos como alternativa viable para atender la falta de capacidad económica requerida para enfrentar los costos asociados a la calidad.

En consecuencia, el objetivo de este estudio fue el desarrollo de una estrategia para la calibración de equipos y cristalería en los laboratorios de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), para el fortalecimiento de la calidad de los resultados de investigación, docencia y de vínculo externo remunerado (venta de servicios).

Metodología

La adecuada gestión de las mediciones es un componente esencial para promover la innovación, el crecimiento, el bienestar y el desarrollo de una sociedad [21]. En este sentido, se debe poner especial atención a la forma en que los laboratorios universitarios abordan temas como magnitudes, unidades de medida, errores e incertidumbres, instrumentos y patrones de medida, calibración, trazabilidad e infraestructura metrológica [16].

Por esta razón, el Programa de Estudios en Calidad, Ambiente y Metrología (PROCAME) de la UNA, ejecutó del 2012 al 2020 un proyecto de investigación con los laboratorios universitarios interesados en: la calibración de equipos y cristalería; la consolidación de una base de datos con los resultados del proceso de calibración; el desarrollo de una cultura en materia de gestión metrológica.

El PROCAME es un programa dirigido al fomento y desarrollo de una cultura ambiental, metrológica y de calidad en Costa Rica, en cooperación con otras entidades del mismo sector, que se encarga de brindar servicios de calibración a instituciones públicas y privadas.

Etapas del estudio

Contacto con los laboratorios

En coordinación con la Vicerrectoría de Investigación (VI) y durante el período de realización del proyecto se enviaron invitaciones a las facultades, y específicamente a las personas coordinadoras de los laboratorios en los diferentes campus de la UNA, con el fin de solicitar la participación del personal de los laboratorios en la ejecución de un programa de calibraciones a instrumentos y equipos de medición de las magnitudes: masa (pesas y masas patrón, instrumentos de pesaje), volumen (cristalería, instrumentos de pistón), temperatura (termómetros digitales y de líquido en vidrio), físico químico (medidores de pH) y dimensional (micrómetros, pie de rey y reglas).

Visita de verificación

Se realizaron visitas periódicas para la aplicación de herramientas de análisis y la construcción de listas de chequeo.

Se identificaron las condiciones físicas de las áreas de trabajo, de tipología, clasificación y magnitudes de los equipos y cristalería de laboratorio, esto con el fin de programar las actividades de calibración y/o verificación; además, de registrar la cantidad y características del personal, condiciones ambientales, entre otros.

Calibración de equipos

Los procedimientos de calibración fueron desarrollados y validados por el personal del Laboratorio de Metrología del PROCAME siguiendo los lineamientos internacionales y los criterios técnicos previamente definidos. También se estableció la frecuencia de calibración según la magnitud de cada equipo o instrumento.

Con el fin de tener un indicador sobre el estado metrológico de los instrumentos, se realizó un comparativo de los resultados obtenidos en la calibración de los instrumentos de pesaje con el reglamento NCR 179:1994 “Instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático” y también de los resultados obtenidos en la calibración de instrumentos volumétricos con la norma BS 1792: 2000 “Especificación para matraces aforados de una marca”, ISO 4788:2005 “Cilindros graduados”, ISO 648:2008 “Pipetas de volumen simple” y la ISO 8655-2:2002 “Pipetas tipo pistón”.

Resultados y discusión

Contacto con los laboratorios

Según datos proporcionados por la VI, en el año de inicio de la investigación (2012) existían 113 laboratorios inscritos en la UNA. Durante la fase de campo se identificaron los llamados “laboratorios no funcionales”, los cuales no fueron considerados dentro del alcance del estudio ya que no requieren el uso de equipos y cristalería, tal es el caso de laboratorios de informática, herbarios, entre otros.

Una vez filtrada la información, se llevó a cabo una convocatoria para participar en la estrategia. A la misma respondieron 50 laboratorios según se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Laboratorios participantes en la investigación.

Campus	Facultad	Escuela/Instituto*	No laboratorios
Omar Dengo	Ciencias de la Tierra y el Mar	ECA	9
		EDECA	2
		CINAT	2
		INISEFOR	1
		IRET	2
		OVSICORI	1
	Ciencias Exactas y Naturales	Ciencias Biológicas	6
		Química	8
	Ciencias de la Salud	Medicina Veterinaria	8
Sede Alajuela			1
Puntarenas	Ciencias Exactas y Naturales	ECMC	7
Liberia		HIDROCEC	3
		TOTAL	50

* Acrónimos utilizados según orden de aparición: Escuela de Ciencias Agrarias (ECA), Escuela de Ciencias Ambientales (EDECA), Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT); Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR), Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), Estación de Ciencias Marino Costeras (ECMC), Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC).

Para el logro de una mejor gestión metrológica en los laboratorios, [1] señalan que se deben producir fondos suficientes para dar soporte a las instalaciones, así como la trazabilidad de los estándares; mantener al personal actualizado en el estado del arte para el desarrollo de nuevas iniciativas técnicas y para apoyar las actividades existentes de calibración y medición.

En este sentido, la VI asignó recursos para la compra de patrones de medida, el pago para ampliar el alcance acreditado del laboratorio de calibración del PROCAME, el mantenimiento de instrumentos, así como la asignación de jornadas laborales para la contratación de recurso humano especializado.

De acuerdo con [9] [23], el último rubro de gastos es el de personal, ya que el laboratorio tiene que desarrollar la competencia para calibrar sus propios equipos. Esto requiere de tiempo, habilidad y entrenamiento.

Visita de verificación

Se realizaron visitas de campo a las instalaciones de cada uno de los laboratorios en la que se aprovechó para brindar charlas de sensibilización a los usuarios internos de los laboratorios. Estas charlas se enfocaban en la importancia de la gestión metrológica. También se estableció una línea base sobre la situación en términos de las necesidades de infraestructura, equipamiento y recurso humano.

Como parte de los hallazgos del estudio se identificó que la mayor parte de los laboratorios no contaban con procedimientos de ensayo validados y que ciertos equipos presentaban problemas debido a una mala utilización o por la falta de uso. En algunos casos, no se contaba con una planificación de las actividades de calibración ni los responsables de estas. En términos generales, no se llevaban registros para asegurar la trazabilidad de las mediciones.

Al respecto, [20] destacan que la gestión metrológica de resultados en el laboratorio mejora a través de una adecuada definición de funciones y responsabilidades, en especial si lo que se busca es consolidar las actividades científicas y técnicas. En la misma línea, [19] indican que los laboratorios que siguen algún tipo de estrategia para asegurar la calidad de los datos que obtienen, muestran un mejor control sobre sus actividades, principalmente el mantenimiento de los equipos, el control de los reactivos y demás insumos, lo que influye en el desempeño de su personal.

Calibración de equipos

En la figura 1 se muestra la cantidad de instrumentos calibrados desde el año 2012 hasta el año 2020 (clasificados por magnitud). A partir del año 2019 se da una tendencia a disminuir el número de instrumentos calibrados, llegando al mínimo valor en el 2020, esto debido a la emergencia sanitaria ocasionada por el Covid-19, ya que las instalaciones de la universidad permanecieron con acceso limitado. En todos los años, los equipos de la magnitud masa fueron lo que más fueron calibrados, especialmente los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático.

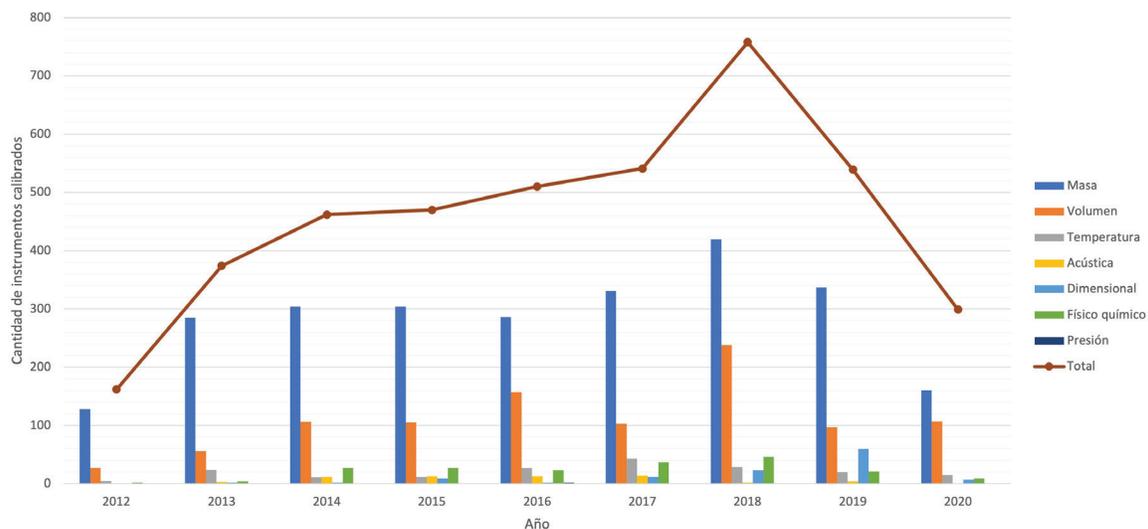


Figura 1. Instrumentos calibrados por PROCAME por magnitud entre el 2012 y el 2020.

Al calcular el costo total de las calibraciones realizadas en forma gratuita por PROCAME, se estima que la UNA ahorró 486 000 USD durante el período de implementación del estudio.

Según [9] el primer gasto por concepto de la gestión metrológica es el costo asociado con la calibración del equipo. Esta inversión se divide en tres partes: gastos de calibración externa, gastos en patrones de medida y tiempo requerido por el personal de laboratorio para calibrar internamente y realizar un seguimiento de la calibración de los instrumentos. Para [20], una investigación no se limita a los resultados de una prueba, sino que incluye la dificultad de estimar el costo de la “no calidad”, por lo que es necesario invertir recursos en tareas que buscan asegurar la idoneidad de los procedimientos de medición.

Por su parte, [1] señalan que los beneficios de la gestión de calibración con niveles adecuados de incertidumbre son: trazabilidad actualizada, difusión de la precisión, mantenimiento del entorno técnico (equipos, reactivos, instalaciones de laboratorio), compra de equipos y suministros, gestión de recursos y riesgos, capacitación del personal en áreas directamente relacionadas con las mediciones que realizan, llevar a cabo el manejo de no conformidades y la implementación de acciones correctivas.

Otros beneficios son: mayor credibilidad y visibilidad externa, mejora de la planificación y de los procesos internos, introducción de conceptos y cultura de calidad, y aumento de la motivación del personal [22]. En todos los casos, es esencial que el método de calibración asegure la trazabilidad a patrones reconocidos internacionalmente [16].

Sobre este tema, de la totalidad de instrumentos identificados se realizaron calibraciones en las magnitudes masa (pesas y masas patrón, instrumentos de pesaje), volumen (cristalería, instrumentos de pistón), temperatura (termómetros digitales y de líquido en vidrio), físico químico (medidores de pH) y dimensional (micrómetros, pie de rey y reglas). En este sentido, la mayor cantidad de instrumentos calibrados corresponden a la magnitud de masa y volumen.

En la figura 2 se muestra el porcentaje de cumplimiento histórico de los instrumentos de pesaje evaluados con respecto al reglamento NCR 179:1994 “Instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático”.

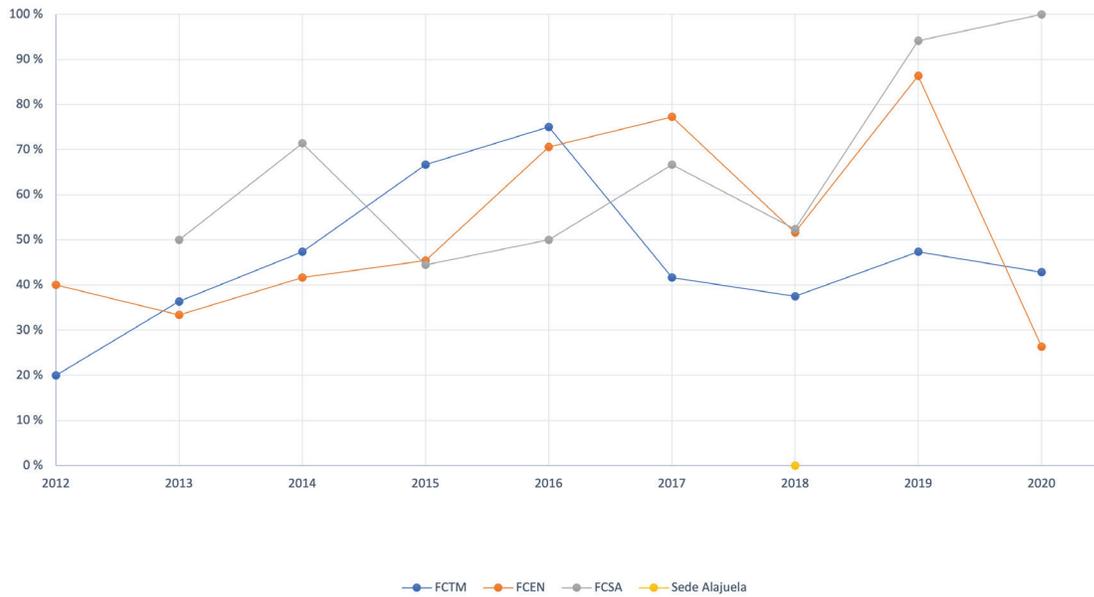


Figura 2. Porcentaje de cumplimiento de los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático, con respecto a las especificaciones del reglamento NCR 179:1994.

Al respecto, no se observó una tendencia clara hacia el cumplimiento en los instrumentos y equipos de los laboratorios analizados, por lo que este comportamiento evidencia que es necesario mejorar la gestión metrológica para generar confianza en la calidad de sus resultados.

De igual manera se evaluaron los instrumentos volumétricos. En la figura 3 se muestra el comportamiento histórico del porcentaje de cumplimiento con las normas BS 1792: 2000 “Especificación para matraces aforados de una marca”, ISO 4788:2005 “Cilindros graduados”, ISO 648:2008 “Pipetas de volumen simple” y la ISO 8655-2:2002 “Pipetas tipo pistón”.

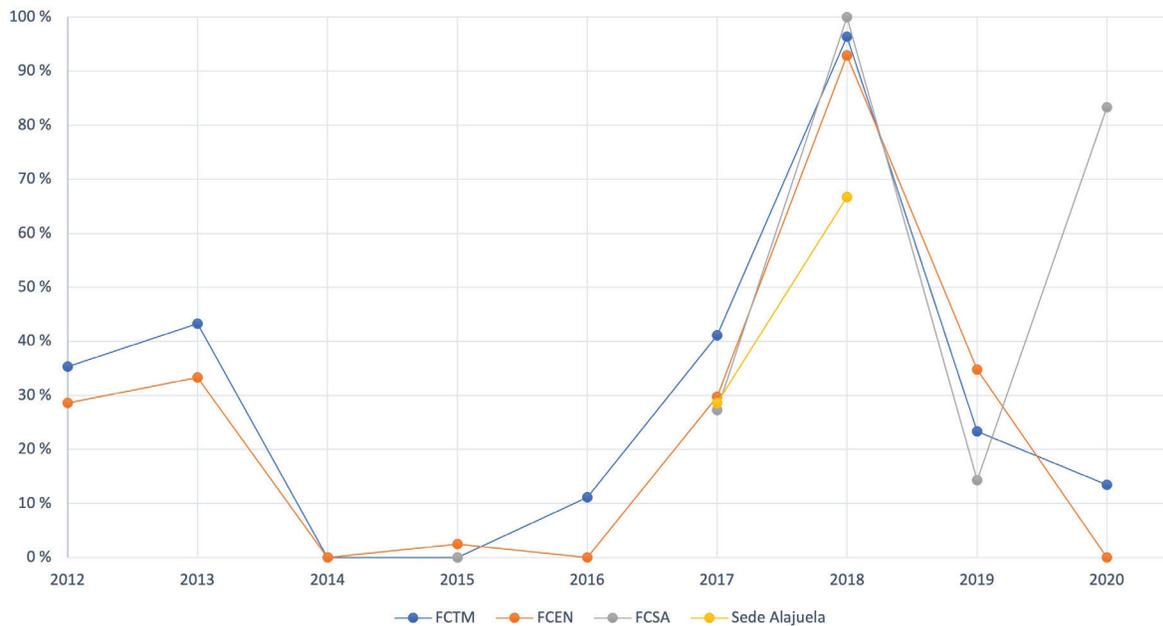


Figura 3. Porcentaje de cumplimiento de los instrumentos volumétricos con respecto a las especificaciones de la norma BS 1792: 2000, ISO 4788:2005, ISO 648:2008 y la ISO 8655-2:2002.

Históricamente no se evidenció un comportamiento hacia el cumplimiento y a excepción del año 2018, los porcentajes de cumplimiento de los instrumentos de los laboratorios analizados fueron bajos, por lo que es necesario que los usuarios tomen las medidas pertinentes para asegurar los procesos de medición donde se utilizan.

Este bajo cumplimiento en los instrumentos evaluados no necesariamente significa que los instrumentos estén fuera de control metrológico, ya que las tolerancias de los procesos internos de los laboratorios pueden ser diferentes a los errores máximos permitidos definidos en las normas de referencia. Sin embargo, esta indicación puede ser una señal de la necesidad de evaluar la gestión metrológica que realizan algunos laboratorios, además de ser una herramienta para la identificación oportuna de errores en las mediciones.

En términos generales, no se cuenta con un presupuesto destinado al mantenimiento y reparación de instrumentos de medición, de manera que se puede ver disminuida la vida útil de estos activos. En todo caso, este estudio ha identificado mecanismos para que los laboratorios cuenten con mediciones trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI), aumentando la confianza en sus resultados, siendo una herramienta clave para la comparabilidad de estos con otros laboratorios y permitiendo la detección de problemas e inclusive disminuyendo la presión económica por concepto de calibraciones.

Conclusiones

Los resultados presentados en esta investigación permiten una mayor comprensión de los desafíos que enfrentan los laboratorios universitarios a la hora de implementar acciones tendientes a la gestión metrológica. Con base en estos hallazgos, es posible concluir que:

Existe la necesidad de establecer procedimientos para la gestión técnica y de calidad de los activos que están a cargo de las personas coordinadoras de los laboratorios. En su mayoría, esta responsabilidad recae en profesionales del propio laboratorio que no cuentan con la formación sobre gestión metrológica de los equipos que tienen bajo su resguardo.

Por otra parte, existe una ausencia de propuestas de solución para diversos problemas comunes en entornos universitarios, esto debido a la diversidad de responsabilidades que las personas coordinadoras de laboratorios deben asumir. En este sentido, se debe tomar en cuenta que la implementación de la gestión metrológica consume tiempo y recursos. Sin embargo, la mejora continua de los procedimientos técnicos, y la certeza de la calidad de los resultados que el laboratorio entrega superan claramente los desafíos.

En el caso específico de la UNA, se han realizado inversiones en equipamiento y capacitación de personal. Sin embargo, no se han logrado cubrir todas las necesidades de trazabilidad de los laboratorios, ya que existen magnitudes para las cuales no se cuenta con los patrones de medida para la calibración de instrumentos, lo que impide la completa gestión metrológica de los resultados.

Los resultados obtenidos mediante las calibraciones de los equipos contra las normas aplicables son un indicador de que debe mejorarse la gestión metrológica, ya que los procesos de medición podrían estar fuera de control y estar generando resultados que no son veraces.

Referencias

- [1] Ruiz, G. A., Padilla, S., Sanchez, J., Nava, R., Valera, B., & Gutierrez, F. M. Effects on R&D and teaching of the ISO 17025 Accreditation in a Calibration University Laboratory.

- [2] Grochau, I. H., Ferreira, C. A., Ferreira, J. Z., & ten Caten, C. S. (2010). Implementation of a quality management system in university test laboratories: a brief review and new proposals. *Accreditation and Quality Assurance*, 15(12), 681-689.
- [3] Zapata-García, D., Llauradó, M., & Rauret, G. (2007). Experience of implementing ISO 17025 for the accreditation of a university testing laboratory. *Accreditation and quality assurance*, 12(6), 317-322.
- [4] Rodima, A., Vilbaste, M., Saks, O., Jakobson, E., Koort, E., Pihl, V., ... & Leito, I. (2005). ISO 17025 quality system in a university environment. *Accreditation and quality assurance*, 10(7), 369-372.
- [5] Miguel, A. L. R., Moreiraa, R. P. L., & Oliveira, A. F. D. (2021). ISO/IEC 17025: history and introduction of concepts. *Química Nova*, 44, 792-796.
- [6] González-Aportela, O., Batista-Mainegra, A., & Fernández-Larrea, M. G. (2020). Sistema de gestión de la calidad del proceso de extensión universitaria, una experiencia en la Universidad de La Habana. *Revista Electrónica Calidad en la Educación Superior*, 11(2), 105-134.
- [7] Grochau, I. H., ten Caten, C. S., & de Camargo Forte, M. M. (2018). Motivations, benefits and challenges on ISO/IEC 17025 accreditation of higher education institution laboratories. *Accreditation and Quality Assurance*, 23(3), 183-188.
- [8] Putri, Z. T., Fahma, F., Sutopo, W., & Zakaria, R. (2019, April). A framework to measure readiness level of Laboratory for Implementing ISO/IEC 17025: a case study. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 495, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- [9] Hullihen, K., Fitzsimmons, V., & Fisch, M. R. (2009). Establishing an ISO 17025 compliant laboratory at a university. *International Journal of Modern Engineering*, 10(1), 55-64.
- [10] Kay, J. F. (2012). Combining ISO/IEC 17025: 2005 and European Commission Decision 2002/657 audit requirements: A practical way forward. *Drug Testing and Analysis*, 4, 25-27.
- [11] Aqidawati, E. F., Sutopo, W., & Zakaria, R. (2019). Model to Measure the Readiness of University Testing Laboratories to Fulfill ISO/IEC 17025 Requirements (A Case Study). *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 5(1), 2.
- [12] Beckett, J., & Slay, J. (2011). Scientific underpinnings and background to standards and accreditation in digital forensics. *Digital investigation*, 8(2), 114-121.
- [13] Honsa, J. D., & McIntyre, D. A. (2003). ISO 17025: practical benefits of implementing a quality system. *Journal of AOAC International*, 86(5), 1038-1044.
- [14] Vlachos, N. A., Michail, C., & Sotiropoulou, D. (2002). Is ISO/IEC 17025 accreditation a benefit or hindrance to testing laboratories? The greek experience. *Journal of food composition and analysis*, 15(6), 749-757.
- [15] Sadikoglu, E., & Temur, T. (2012). The relationship between ISO 17025 quality management system accreditation and laboratory performance. *Quality Management and Practices*, 13, 221-230.
- [16] Millea, A., Munteanu, R., & Marcus, I. U. (2003, June). Teaching general metrology: why, what, how. In XVII IMEKO World Congress.
- [17] Cebekhulu, B. M. B., & Mugova, C. (2017, July). Quality control in a university laboratory: evaluating the gap between ISO/IEC-17025 requirements and the thin section Laboratory's processes. In *Proceedings of the International Symposium on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*. Bristol (pp. 614-25).
- [18] Almeida, L. A., Frota, M. N., & Frota, M. N. (2003, June). Metrology education and citizenship: the Brazilian experience. In *Proceedings do XVII IMEKO World Congress: Metrology in the 3rd. Millennium*. Dubrovnik, Croatia, June (pp. 22-27).
- [19] Gawor, A., Kurek, E., Ruszczyńska, A., & Bulska, E. (2021). Key issues related to the accreditation of academic laboratories. *Accreditation and Quality Assurance*, 26(6), 285-291.
- [20] Martínez-Perales, S., Ortiz-Marcos, I., & Ruiz, J. J. (2021). A proposal of model for a quality management system in research testing laboratories. *Accreditation and Quality Assurance*, 26(6), 237-248.
- [21] Zaimović-Uzunović, N., & Lemeš, S. (2008). Importance of Metrology Education-B&H Case. In *1st Regional Metrology Organisations Symposium-RMO*.
- [22] Fernandes, E. A. D. N., Bacchi, M. A., Tagliaferro, F. S., Gonzaga, C. L., De França, E. J., Favaro, P. C., & de Angelis Fogaça, A. (2006). Quality system implementation in a Brazilian university laboratory. *Accreditation and Quality Assurance*, 10(11), 594-598.
- [23] Osanna, P. H., Durakbasa, N. M., Kräuter, L., & Güclü, E. (2007). A modern scheme for education, training and certification of metrology and measurement technique personnel. na.

Optimización del diseño de un reactor de gasificación por plasma a través de simulaciones computacionales numéricas

Design optimization of a plasma gasification reactor utilizing computational numerical simulations

Alberto Castillo-Benavides¹, Gustavo Richmond-Navarro²,
Esteban Zamora-Picado³, Carlos Arias-Arguedas⁴

Fecha de recepción: 2 de septiembre, 2022
Fecha de aprobación: 12 de diciembre, 2022

Castillo-Benavides, A; Richmond-Navarro, G; Zamora-Picado, E; Arias-Arguedas, C. Optimización del diseño de un reactor de gasificación por plasma a través de simulaciones computacionales numéricas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 34-49.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6375>

- 1 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jose.castillobenavides@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5177-3482>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: grichmond@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: ezamora@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1753-8291>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: carlosluis111@estudiantec.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0463-353X>

Palabras clave

Plasma; reactor de gasificación; residuos; syngas; optimización geométrica; simulación

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue el desarrollo de una geometría optimizada para un reactor de gasificación de residuos municipales con plasma. Se realizó una simulación numérica de la geometría bidimensional de un reactor de gasificación por plasma con el fin de conseguir un rendimiento optimizado con el uso del software COMSOL Multiphysics. Se definieron condiciones iniciales del reactor y se crearon 16 distintas combinaciones geométricas que varían cuatro aspectos geométricos del reactor: los radios inferior y superior de la cámara de gases, la longitud central de la cámara y el volumen de la cámara de fundición. De estas, fueron halladas dos combinaciones que optimizan los aspectos de mezclado de gases y transferencia de calor hacia el ambiente. Se confirmó que los diseños planteados alcanzan las temperaturas necesarias para la fundición y gasificación de los desechos. Además, el material fundido teórico alcanza la viscosidad necesaria menor a 10 Pa s para poder fluir fuera del reactor.

Keywords

Plasma; gasification reactor; wastes; syngas; geometric optimization; simulation

Abstract

The main objective was the development of an optimized municipal waste gasification reactor geometry utilizing plasma. Here, numerical simulation utilizing the COMSOL Multiphysics software was used to achieve an optimized bidimensional geometry. Initial conditions for the reactor were defined using the researchers' experience. Then, 16 different combinations of four geometric parameters were set, where the gas chamber's superior, and inferior radius, its length and lastly the fusing chamber volume were varied. Of these, two combinations that optimized the mixing of gases and heat exchange with the exterior were found. It was confirmed that these designs allowed for the proper melting and gasification of the theoretical waste. Further, the smelted material also possessed a viscosity lower than 10 Pa s needed to flow out of the reactor.

Introducción

La gasificación de desechos sólidos es una de las tecnologías térmicas que convierte los desechos en energía aprovechable; otras opciones son la combustión y la pirolisis. En la gasificación los residuos son expuestos a temperaturas suficientemente altas (entre los 800 K y los 4000 K) lo que transforma los compuestos orgánicos en gas de síntesis que puede ser utilizado como fuente de potencia (generación de vapor, motores y celdas combustibles), sustituto de combustibles y reactivo para la fabricación de biocombustibles. Los compuestos inorgánicos son fundidos por completo, y de esta parte se recuperan metales y se produce un vitrificado inerte, no dañino con el medio ambiente, que puede ser utilizado como material para la construcción [1].

I-PLARE REACTOR (Etapa 2) fue parte de una línea de investigación la cual cuenta como antecedentes un estudio preliminar de la tecnología y su potencial para Costa Rica [2] y un proyecto de investigación previo denominado I-PLARE REACTOR, en el cual se inició formalmente el análisis de la tecnología. El proyecto I-PLARE REACTOR (Etapa 2) implementó la optimización del rendimiento del reactor de gasificación por plasma desarrollado en I-PLARE REACTOR (Etapa 1). Esta optimización se enfocó en el rediseño geométrico parametrizado

para determinar las características geométricas óptimas del reactor con la finalidad de mejorar su rendimiento, además de una caracterización del funcionamiento del reactor considerando variaciones en la composición de residuos de alimentación. El proceso de optimización se realizó a través de simulaciones computacionales de dinámica de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) utilizando el software COMSOL Multiphysics.

Algunos autores como [3] destacan que una comprensión profunda de los flujos y la química, obtenidos a través del modelado computacional, puede ayudar en gran medida el proceso de diseño. Los trabajos de simulación CFD han demostrado ser un medio eficaz para el análisis de diseño y la optimización de procesos de conversión de energía [4], [5], [6], [7], [8], y en particular para la gasificación por plasma térmico [1], [9], [10], donde ahorra costos económicos y permite tener acceso a datos que ni siquiera podrían ser medidos experimentalmente.

Marco teórico

Ante la creciente producción de los residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos industriales peligrosos se han propuesto varios procesos térmicos que permitan la destrucción de la parte orgánica de los residuos y la conversión del sobrante inorgánico en un residuo inerte, reutilizable, que no sea dañino para el ambiente y que no tenga que ser almacenado en un vertedero de residuos. La incineración, pirolisis, fundición o vitrificación, son algunos ejemplos de estos procesos [11]. Los plasmas térmicos fueron utilizados durante mucho tiempo únicamente para destruir desechos peligrosos y en procesos industriales. Sin embargo, debido al creciente interés en tecnologías que permitan aprovechar la energía latente en los desechos (“*waste-to-energy processes*” [12]) se han desarrollado varias tecnologías que permiten obtener gas de síntesis (*syngas*) de los residuos sólidos, una de ellas es la gasificación por plasmas térmicos [12].

Según [13] la gasificación es una tecnología de proceso que está diseñada con el propósito de producir gas de síntesis a través de la conversión química de los materiales carbonosos en un proceso que implica la oxidación parcial de materiales. Este proceso se lleva a cabo en una atmósfera reductora en presencia de un agente gasificante, a temperaturas suficientemente altas para convertir la materia inorgánica a un material sólido vítreo.

Los gasificadores por plasma térmico presentan varias ventajas en comparación con tecnologías convencionales: altos rendimientos con reactores relativamente compactos, altas tasas de enfriamiento y calentamiento ($>10^6$ K/s), bajos flujos de gases de escape y gran facilidad para fundir los residuos inorgánicos [11]. Por otro lado, aunque la viabilidad económica de este tipo de tecnologías ya ha sido demostrada, una de las grandes desventajas es el alto costo de inversión inicial para la puesta en marcha de una planta de tratamiento de este tipo [14].

La simulación numérica mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), es un medio eficaz para el análisis y la optimización de los procesos de conversión de energía [4]. En [15] han utilizado aplicaciones actuales de la herramienta de CFD en el diagnóstico de los sistemas de incineración de residuos y la evaluación de los cambios en las condiciones de funcionamiento. En [4] se ha realizado el estudio en detalle de los modelos CFD de la capa de combustión fluidizado burbujeante de plantas de conversión de residuos en energía y demostraron que los modelos en 3-D basados en CFD pueden predecir con éxito el comportamiento del sistema de combustión de lecho fluidizado. En un estudio similar, [5] demuestra que las simulaciones CFD pueden proporcionar información fundamental sobre la naturaleza de las características de flujo y el subsiguiente patrón de flujo de gas en la cámara de reacción de un gran incinerador de residuos sólidos municipales. Varios otros estudios ([6], [7], [8] y [16]) han señalado que la simulación numérica mediante CFD se puede utilizar con eficacia en la evaluación del diseño y optimización de procesos de conversión de residuos en energía.

En [1] se plantea un modelado matemático para el proceso del reactor de Yblin, Israel, el cual se pudo validar a través de mediciones experimentales. Su trabajo comprendió el desarrollo de un modelo 0-dimensional para la compresión del proceso químico al interior del reactor y un modelado 2-dimensional que comprendía la interacción de los fluidos dentro del reactor, las reacciones químicas y la transferencia de calor. Además, se consideraron variaciones en parámetros como: flujos de aire secundario, potencia de las antorchas de plasma y alimentación de vapor de agua sobrecalentado al proceso. Su trabajo logró definir un rango de parámetros de operación bajo los cuales se logra extraer un gas de síntesis con un mayor valor calorífico (LHV por sus siglas en inglés). Gracias a la simulación numérica del modelo planteado por Zhang, la optimización de los parámetros de operación del reactor fue posible y brindó un mejor entendimiento del proceso.

En la fase previa a esta investigación, [17] implementó un modelo computacional basado principalmente en los trabajos de [1], en el cual se incorporaba la dinámica de fluidos, la transferencia de calor y el transporte de especies diluidas para modelar el reactor en diseño. Se utilizaron los resultados de [1] para validar sus modelos y con base en ellos, analizó el diseño existente de reactor en ese momento y valoró la variación de ciertos parámetros geométricos y térmicos del proceso. Se logró determinar, para el diseño propuesto, cuáles parámetros tenían poca influencia en el rendimiento del reactor y cuales tenían gran influencia.

En esta misma fase previa, [18] implementó otro modelo computacional en donde incluía la dinámica de fluidos, la transferencia de calor y además el transporte de especies concentradas basado principalmente en el trabajo previo de [10], validando sus resultados contra esta misma referencia.

Tanto el trabajo de [17], como el de [18] forman la base común de la presente investigación a nivel de modelos computacionales, donde los aspectos comunes a ambos trabajos se resumen, en el caso de los reactores ideales, al conjunto de modelos representados por las ecuaciones (1k), (2i), (3), (4), (5), (6) y (7).

$$v_{1k}c_1 + v_{2k}c_2 + \dots + v_{rk}c_r \leftrightarrow v'_{1k}c'_1 + v'_{2k}c'_2 + \dots + v'_{rk}c'_r \quad (1k)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = R_i = \sum_k v_{ik}r_k \quad (2i)$$

$$r_k = k^{for} \prod_r c_i^{-v_{rk}} - k^{rev} \prod_p c_i^{v_{pk}} \quad (3)$$

$$k^{for} = A^{for} e^{\left(\frac{-E_{for}}{RT}\right)} \quad (4)$$

$$k^{rev} = A^{rev} e^{\left(\frac{-E_{rev}}{RT}\right)} \quad (5)$$

$$K_{eq} = \frac{k^{for}}{k^{rev}} = \frac{\prod_p c_i^{v_{pk}}}{\prod_r c_i^{-v_{rk}}} \quad (6)$$

$$F = \frac{RT}{p} \sum_i F_i \quad (7)$$

En el caso de los reactores no ideales, ambos trabajos coinciden en la mayoría de aspectos y los modelos comunes son representados por (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), y (16).

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + (\mu + \mu_T) \nabla \cdot \vec{\tau} - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) \nabla \cdot \vec{v} + \vec{f} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (9)$$

$$\rho = \frac{pM_n}{RT} \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \kappa = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \kappa \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (12)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (13)$$

$$P_k = \mu_T \left[\nabla \vec{v} : \vec{\tau} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v})^2 \right] - \frac{2}{3} \rho \kappa \nabla \cdot \vec{v} \quad (14)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_{reac} \quad (15)$$

$$Q_{reac} = \sum_k r_k H_k \quad (16)$$

Cabe destacar que el presente modelo permite estimar la composición de gases de síntesis en conjunto con la variabilidad de las familias de componentes químicos presentes en los residuos sólidos municipales. Este modelo se basa no solo en los compuestos biomásicos, sino también en especies plásticas que pueden estar presentes.

Finalmente, la tecnología de gasificación ha demostrado ser un medio eficiente para lograr procesos de conversión de desechos en fuentes energéticas utilizables, un ejemplo de ello es el gas de síntesis. Esta tecnología contribuye a la reducción de grandes volúmenes de desechos que, de otra manera, deberían ser depositados en un vertedero a cielo abierto. El proceso de gasificación de desechos sólidos envuelve fenómenos químicos y físicos muy complejos (ecuaciones 1-16), sensibles a cambios por variaciones en la geometría del reactor, la potencia de las antorchas y los flujos de alimentación y extracción de las materias. Las simulaciones computacionales de la mecánica de fluidos son una herramienta que permite comprender estos fenómenos y optimizar las variables del proceso y la geometría de los reactores de gasificación con la finalidad de alcanzar procesos cada vez más eficientes, que permitan reducir costos y obtener gas de síntesis de un grado energético más alto.

Materiales y métodos

Se establecieron, en orden de prioridad, las variables geométricas a optimizar para el diseño nuevo planteado por el grupo comparándolas con los procesos de optimización presentes en la literatura y tomando en cuenta los puntos de mejora del diseño presentado en la etapa 1

del proyecto I-PLARE REACTOR. Se estableció como criterios de optimización la obtención de la mayor temperatura promedio de la fase gaseosa para asegurar condiciones cercanas al equilibrio químico y la mayor velocidad promedio en el dominio gaseoso del reactor con el fin de asegurar el mezclado de las especies gaseosas presentes, así como el mayor poder calorífico inferior del syngas obtenido. Se crearon los modelos 2D del reactor con las diferentes variaciones geométricas a evaluar en AutoCAD. Se implementó el modelo matemático con las respectivas condiciones de frontera, en el modelo 2D del reactor y se realizaron las simulaciones utilizando COMSOL Multiphysics. Las simulaciones se realizaron considerando los módulos de dinámica de fluidos, químicos y transporte de especies utilizados y consideraciones de los trabajos previos [17] y [18]. Con base en los criterios de optimización indicados anteriormente, se analizaron los datos brindados por las simulaciones y se determinó la geometría óptima para el diseño del reactor.

El proyecto I-PLARE REACTOR (etapa 1) permitió una primera aproximación al grupo de investigadores al tema del modelado y al diseño del reactor en varios aspectos generales y otros específicos. Respecto a los específicos es importante retomar algunos de ellos:

Respecto al diseño del reactor desarrollado por [19] se indica que esencialmente consiste en un escalamiento geométrico del reactor de [1] considerando la tasa de consumo de RSU de 1 a 2 toneladas diarias. Si bien los análisis realizados por [17] y [18] avalan el funcionamiento de ese diseño de reactor de gasificación, este último indica varias opciones de mejora tales como incluir más consideraciones operativas y prácticas en el diseño, así como apuntar a un diseño más compacto con menos pérdidas de energía dado el tipo de tecnología, pero principalmente por la tasa de procesamiento del reactor. El presente grupo de trabajo considerando estas recomendaciones, y de igual forma, otras tales como incluir más variables geométricas de diseño, incluir más aspectos relacionadas con el proceso químico y termodinámico, y retroalimentándose con experiencia proveniente de la industria, optó por plantear una nueva geometría, configuración de reactor y materiales obteniendo un diseño base que posteriormente fue optimizado geoméricamente.

Respecto al modelo computacional del reactor desarrollado por [17] y [18] los cuales corresponden a implementaciones locales de los trabajos de [1] y [10] respectivamente, ambos indican posibilidades de mejora en sus modelos, lo cual se tomó en cuenta de la siguiente manera: la mejora en el modelo de turbulencia, en la inclusión del dominio sólido (aislantes de la cámara interna) y líquido (cámara de fundición) y una ampliación de la materia prima que el reactor puede admitir en su ingreso dada la ampliación de las especies químicas consideradas en el modelo computacional. Algunas consideraciones al final no fueron tomadas en cuenta por la alta razón costo/beneficio (se presentaban problemas de convergencia al realizar acoples multifísicos, lo cual aumentaba la no linealidad del grupo de ecuaciones del modelo computacional) que implicaba incluirlas en el modelo. Estos son los casos de las reacciones heterogéneas de múltiples fases e inclusión de los RSU propiamente como una fase sólida que pasaba a gaseosa. Una consideración que sí se incluyó parcialmente fue incluir la transferencia de calor por radiación en el modelo, pero al considerarse simultáneamente con las reacciones químicas resultó tener un impacto poco significativo, pero sí un aumento considerable en las demandas computacionales, lo que llevó a descartar su inclusión en los modelos finales.

En el diseño del reactor de gasificación estudiar el comportamiento de los fluidos y el calor es esencialmente obligatorio, permitiendo evaluar la eficacia de la geometría en transferir la energía para asegurar la presencia de equilibrios termodinámicos que permitan la conversión completa de las reacciones principales del proceso de gasificación y generación de syngas. Por tanto, el modelo básicamente se limita a un sistema gaseoso y otro líquido a alta temperatura, con el fin de separar el proceso de gasificación en dos principales procesos, el primero la etapa de

volatilización rápida del RSU por las antorchas de plasma gobernado por fluidos gaseosos de alta temperatura y una segunda etapa de fundición de metales y escorias dentro de la sección de fundición en la parte baja del reactor.

Geometría

La simulación numérica permite evaluar modelos geométricos en cero, una, dos o tres dimensiones para comprender y predecir el flujo de los fluidos y el calor. El proceso de simulación inicia definiendo la geometría del reactor, la cual se puede separar en tres etapas de operación (ver Figura 1), en específico:

- Etapa 1 – Descomposición térmica del RSU: Relacionada con la trayectoria seguida por los materiales a gasificar, que generalmente tienen exceso de humedad y están a temperaturas muy inferiores a los necesarios para que ocurra la gasificación. Resulta necesario incrementar su temperatura transfiriendo calor de las paredes del reactor y de los gases generados en la siguiente etapa.
- Etapa 2 - Gasificación: En esta etapa se da la gasificación de los desechos, ya sea en las instancias de las paredes del gasificador o al interactuar con el fundido y los gases calientes de la antorcha de plasma.
- Etapa 3 - Fundición: Es una fase fundida, alimentada con las cenizas de los desechos, las que a su vez se encapsulan en un vitrificado.

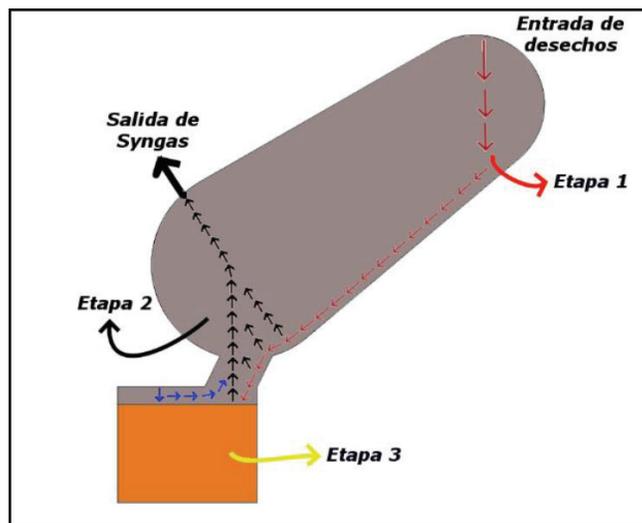


Figura 1. Geometría del sistema de gasificación propuesto y sus etapas.

Es muy importante notar que la Figura 1 representa los primeros planteamientos geométricos del reactor, pero esta geometría fue cambiada cuando se notaron las necesidades calóricas elevadas en la cámara de fundición. A partir de la Figura 4 se notará que la entrada de los desechos se da por el lado de la cámara inferior de fundición y la salida del Syngas sucede por la parte superior del reactor.

Una vez superado el proceso de planteo de la geometría del reactor es necesario evaluar su funcionamiento simulando numéricamente los principales fenómenos fluidodinámicos y térmicos con el fin de observar el comportamiento de los gases en la geometría y evaluar las variables que permitirán mejorar el diseño y maximizar su desempeño.

Para su modelado y posterior simulación, no se toma en cuenta los desechos sólidos previos a su gasificación, principalmente por la complejidad que conllevaría asumir una simulación de este tipo, y por lo tanto el modelo se simplifica en dos dominios, como se muestra en la Figura 2.

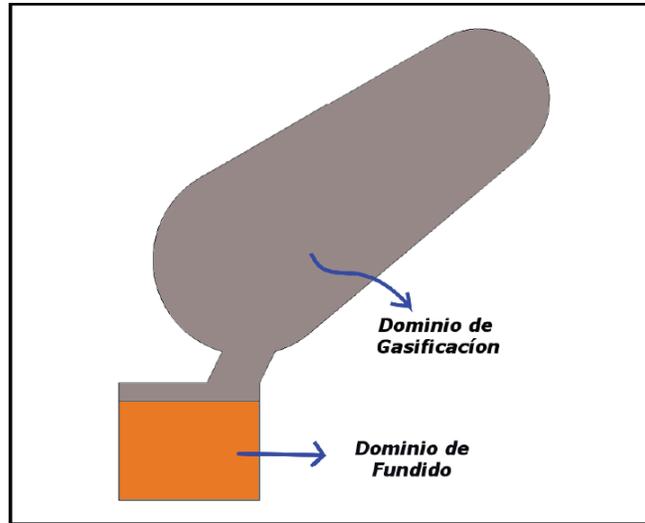


Figura 2. Modelo geométrico del reactor.

- Dominio de gasificación: como se observa en la Figura 2 representa el mayor volumen en el sistema y se modela como un fluido compuesto por los gases calientes de la antorcha de plasma y el gas generado del sólido por gasificación.
- Dominio de fundición: Consiste en un fluido vítreo, cuyas temperaturas deberían permanecer alrededor de 1200 K. La transferencia de calor para mantener el material fundido debe realizarse en gran medida desde los gases calientes de la antorcha de plasma, pero también de igual forma con electrodos eléctricos internos para reducir el enfriamiento interno y eventuales estancamientos.

Modelos físicos y matemáticos

En el modelamiento físico y matemático de un sistema como el dominio de gasificación se debe incluir principios básicos como la conservación de energía, la masa y el momento. Del estudio en conjunto de estos tres fenómenos y asumiendo que el fluido objeto de estudio es del tipo newtoniano y compresible, las ecuaciones de Navier-Stokes siguen tomando la forma de las ecuaciones (8), (9) y (10) consideradas en el modelo base de [18].

Es necesario incluir el efecto de la turbulencia en los gases, lo cual en este nuevo trabajo constituye una mejora del modelo base, ya que se considera un modelo más elaborado que el modelo κ - ω de [20]. De esta forma las ecuaciones (11, 12 y 13) son sustituidas por sus formas primadas (11', 12' y 13'):

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\kappa = P_{\kappa} - \beta^* \rho \kappa \omega + \nabla \cdot [(\mu + \sigma^* \mu_T)\nabla \kappa] \quad (11')$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\omega = \alpha \frac{\omega}{\kappa} P_{\kappa} - \beta^* \rho \omega^2 + \nabla \cdot [(\mu + \sigma \mu_T)]\nabla \omega] \quad (12')$$

$$\mu_T = \rho \frac{\kappa}{\omega} \quad (13')$$

Donde la energía cinética turbulenta κ , la tasa de disipación específica ω y la viscosidad de Eddy μ_T se calculan de acuerdo con esas ecuaciones. P_κ se sigue calculando de la misma forma (ecuación 14), pero además de eso es necesario incorporar los coeficientes de cierre para el modelo [20].

$$\alpha = \frac{13}{25}, \quad \beta = \frac{13}{25}, \quad \beta^* = \frac{9}{100}, \quad \sigma^* = \frac{1}{2} \quad (14')$$

En relación con la transferencia de calor en el dominio de gasificación y fundición, se estudian los mecanismos de conducción y convección, por medio de las ecuaciones para la ley de Fourier y de balance de energía. Para el dominio de fundición se aproxima como un sólido, por lo que el mecanismo de transferencia es conducción y el modelo matemático permanece igual a la ecuación anterior.

Planteamiento del diseño de experimentos para el estudio del diseño de la geometría del reactor

El diseño de la geometría se realiza de forma colaborativa tomando en cuenta la experiencia en sistemas de gasificación, manejo de sólidos, diseño mecánico, ingeniería en materiales y previas investigaciones del equipo investigador, cuya propuesta inicial fue la geometría de la Figura 1. De esta nueva geometría se identifican los parámetros geométricos que podrán tener una incidencia sobre el desempeño del reactor, se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros geométricos del modelo.

Parámetro	Unidades	Valor	Descripción
S	(cm)	0	Separación de la salida respecto al punto de tangencia
D _{ent}	(cm)	10	Diámetro de entrada
D _{syn}	(cm)	10	Diámetro de salida del syngas
D _{sal}	(cm)	15	Diámetro de la salida inferior
$\beta_{inclinación}$	(°)	35	Inclinación
delta	(°)	65	Inclinación de la conexión entre módulos
Base	(cm)	40	Base de la cámara de fundición
D _{antorcha}	(cm)	1	Diámetro de la antorcha
S _{antorcha}	(cm)	4	Separación de la antorcha respecto del borde
H _{gases}	(cm)	5	Alto de cámara de gasees en módulo de fundición
H _{vidrio}	(cm)	10	Alto del sector lleno de vidrio fundido
D _{slag}	(cm)	1	Diámetro de salida del slag
D _{ash}	(cm)	1	Diámetro de entrada de ceniza

En la Figura 3 se presentan estos parámetros de forma visual.

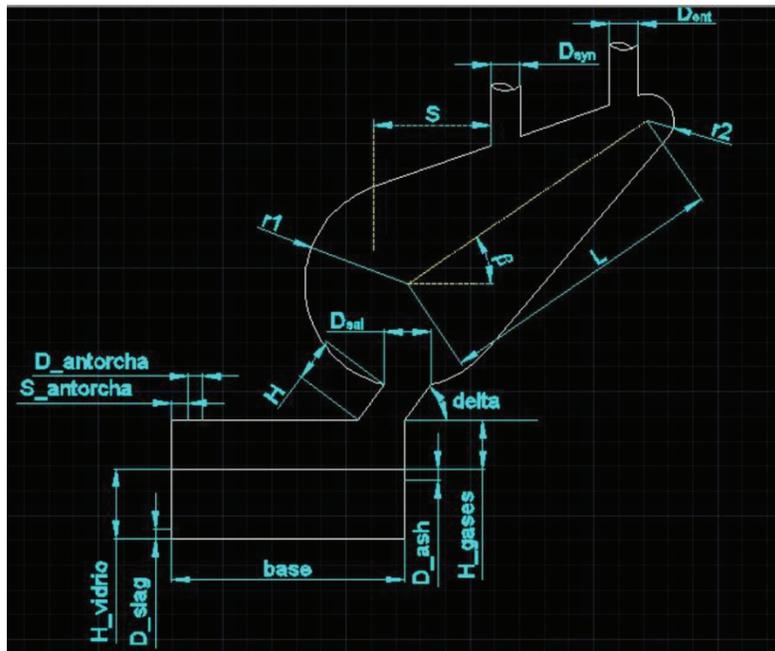


Figura 3. Todos los posibles parámetros a dimensionar en el volumen interno del reactor.

Las condiciones iniciales de la simulación, así como los niveles a los que serán probados los parámetros R_1 , R_2 , L y H se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Condiciones iniciales para el modelado del sistema de gasificación.

Condición	Unidades	Valor	Descripción
$P_{inicial}$	(Pa)	0	Presión inicial del sistema
$U_{inicial}$	(m/s)	0	Velocidad inicial del sistema
$U_{0 \text{ antorcha}}$	(m/s)	15	Velocidad salida de gases de antorcha
$P_{0 \text{ gases desechos}}$	(Pa)	0	Presión inicial de salida de gases
$U_{0 \text{ gases desechos}}$	(m/s)	0,8	Velocidad de entrada de gases de desechos
$T_{inicial \text{ del sistema}}$	(K)	600	Temperatura inicial del sistema
$T_{antorcha}$	(K)	2500	Temperatura de antorcha
$T_{desechos}$	(K)	450	Temperatura de desechos
$P_b \text{ potencia fundida}$	(W)	5000	Potencia suministrada al fundido
T_{ext}	(K)	293,15	Temperatura externa
R_1	(cm)	0,25 – 0,3	Radio inferior cámara de gases
R_2	(cm)	0,1 – 0,2	Radio superior cámara de gases
L	(cm)	0,7 – 0,8	Longitud central cámara de gases
H	(cm)	5 - 15	Longitud de la sección de conexión entre la región de gasificación y fundición

Con este gran número de parámetros se plantea un diseño de experimentos del tipo 2^4 con tratamientos R_1 , R_2 , L y H para determinar el conjunto de combinaciones que maximizan el mezclado de los gases y minimiza la transferencia de calor hacia el exterior del reactor. Como variables a impactar se establecen la velocidad promedio de los fluidos dentro del reactor

(\bar{V}), la temperatura promedio del fluido (\bar{T}_{fluido}) y la temperatura promedio en la carcasa externa del aislante térmico del reactor (\bar{T}_{camisa}), para las condiciones iniciales del Cuadro 2. Este diseño de experimentos, con cada una de las pruebas a realizar se detalla en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Diseño de experimentos empleado para los parámetros a variar.

Prueba	R ₁ (cm)	R ₂ (cm)	L (cm)	H (cm)
1	25	10	70	5
2	25	10	70	15
3	25	10	80	5
4	25	10	80	15
5	25	20	70	5
6	25	20	70	15
7	25	20	80	5
8	25	20	80	15
9	30	10	70	5
10	30	10	70	15
11	30	10	80	5
12	30	10	80	15
13	30	20	70	5
14	30	20	70	15
15	30	20	80	5
16	30	20	80	15

Con estas pruebas definidas, se procede a realizar la simulación de cada una de ellas con el objetivo de encontrar la configuración óptima del reactor.

Resultados y discusión

Resultados térmicos y de los fluidos

En esta sección se presentan los resultados junto con su discusión correspondiente de las simulaciones realizadas. Primero, se presentan en el Cuadro 4 los resultados numéricos de las variables a medir (definidas adelante) junto con el cálculo de un indicador que maximiza el desempeño deseado del reactor. Posteriormente, se realiza un análisis de los campos de velocidad y temperatura de las configuraciones que resulten óptimas.

Las variables medidas para cada una de las pruebas de los reactores simulados son las siguientes: \bar{V} : Velocidad promedio, \bar{T}_{fluido} : Temperatura del fluido, \bar{T}_{camisa} : Temperatura de la camisa, $V_{antorcha}$: Velocidad de la antorcha. Con estas mediciones se obtienen las

relaciones de $\frac{\bar{V}}{V_{antorcha}}$ y $\frac{\bar{T}_{fluido}}{\bar{T}_{camisa}}$ junto con el indicador $\beta = \frac{\bar{V}}{V_{antorcha}} * \frac{\bar{T}_{fluido}}{\bar{T}_{camisa}}$. Ambas de estas relaciones junto con el indicador se desean maximizar.

Además, la primera de estas relaciones busca maximizar el mezclado de los gases, la segunda de estas minimiza la transferencia de calor hacia el ambiente y el indicador representa la configuración que tendrá la mejor relación respecto a mezclado y pérdidas de calor al exterior.

Cuadro 4. Resultados de las diferentes configuraciones empleadas.

Prueba	\bar{V} (m/s)	\bar{T}_{fluido} (K)	\bar{T}_{camisa} (K)	$\frac{\bar{V}}{V_{antorcha}}$	$\frac{\bar{T}_{fluido}}{\bar{T}_{camisa}}$	Indicador β
1	5,296	1922,8	1708,1	0,211 840	1,125 695	0,238 467
2	5,1591	1948,2	1706,5	0,206 364	1,141 635	0,235 592
3	5,2023	1930,2	1705,4	0,208 092	1,131 817	0,235 522
4	5,0289	1955,3	1700,2	0,201 156	1,150 041	0,231 338
5	4,9763	1930,1	1686,2	0,199 052	1,144 645	0,227 844
6	4,8047	1968,1	1698,0	0,192 188	1,159 069	0,222 759
7	4,8053	1923,9	1672,1	0,192 212	1,150 589	0,221 157
8	4,6197	1968,9	1687,3	0,184 788	1,166 894	0,215 628
9	5,2192	1939,8	1688,3	0,213 168	1,148 966	0,244 923
10	5,0814	1960,6	1701,2	0,203 256	1,152 481	0,234 249
11	5,2731	1953,2	1692,5	0,210 924	1,154 032	0,243 413
12	4,9295	1970,4	1689,8	0,197 180	1,166 055	0,229 923
13	4,9099	1937,9	1666,8	0,196 396	1,162 647	0,228 339
14	4,7159	1974,1	1680,8	0,188 636	1,174 500	0,221 553
15	4,7248	1940,3	1658,9	0,188 992	1,169 630	0,221 051
16	4,5395	1982,1	1679,4	0,181 580	1,180 243	0,214 309

Magnitud de velocidad de los gases y campo vectorial de velocidades

En las siguientes figuras (Figura 4 y Figura 5) se muestra el campo de velocidades generado por el flujo de los gases en el reactor. Se puede observar como los gases de la antorcha al incidir sobre el fundido y mezclarse con los gases de los desechos sólidos transfieren su calor, incrementando su temperatura como se observa en la Figura 6 y de igual manera la magnitud de la Figura 5.

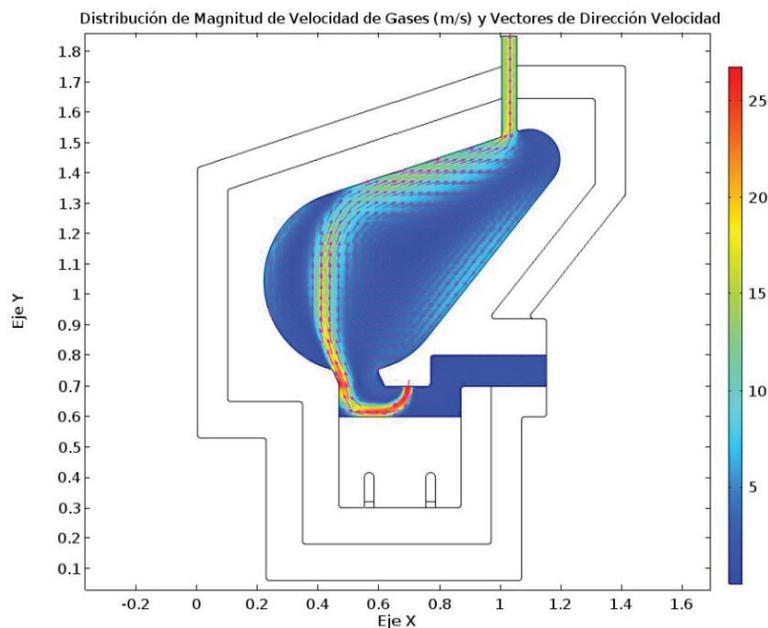


Figura 4. Resultados del campo de velocidad en la configuración 9.

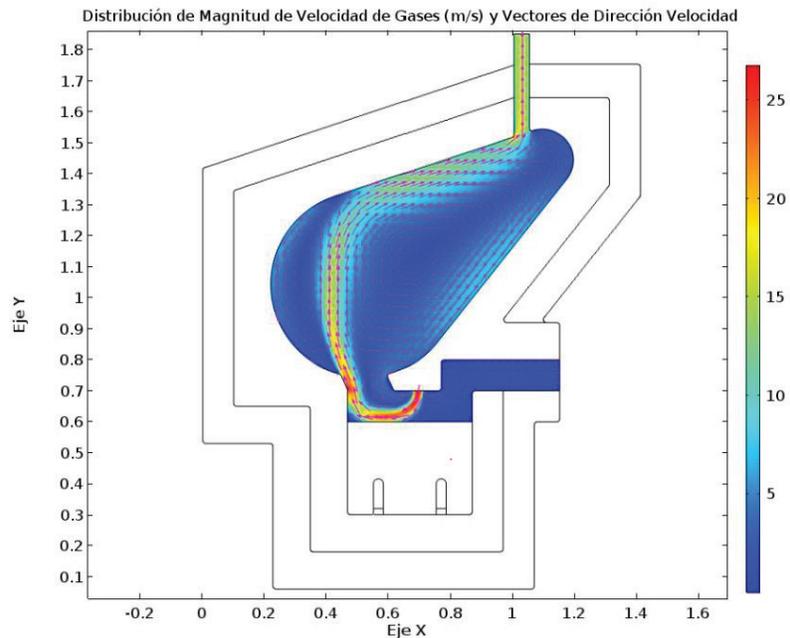


Figura 5. Resultados del campo de velocidad en la configuración 16.

Notar que a partir de esta Figura 4 se da el cambio en la geometría y la entrada de desechos del reactor. El cambio se llevó a cabo luego de algunas pruebas preliminares de CFD y calor sobre la cámara de fundición. Con estas pruebas se concluyó que era necesario realizar la alteración y una inclusión adicional de dos electrodos de fundición, los cuales constituyen elementos de calefacción (estos electrodos también son utilizados en la industria de fundición de vidrio).

De la Figura 6 se destaca como los gases en la cámara tienen una temperatura alta y su distribución es bastante uniforme, comparando con los gases generados por los desechos sólidos. Esto evidencia que sí hay una adecuada transferencia de energía.

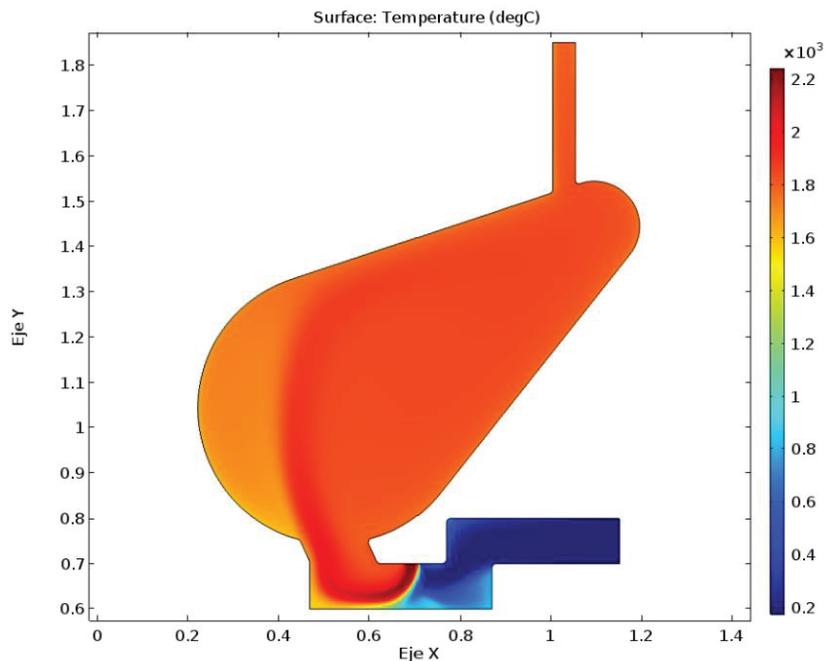


Figura 6. Resultados del campo de temperatura de la configuración 9, para del dominio fluido.

En relación con la pérdida de energía por conducción hacia el ambiente, la Figura 7 muestra la distribución de la temperatura para la configuración 16, cuyas variantes presentaron el mejor desempeño en cuanto a la transferencia de calor hacia las capas externas del aislante térmico, en donde las temperaturas alcanzan los alrededores de los 240 °C.

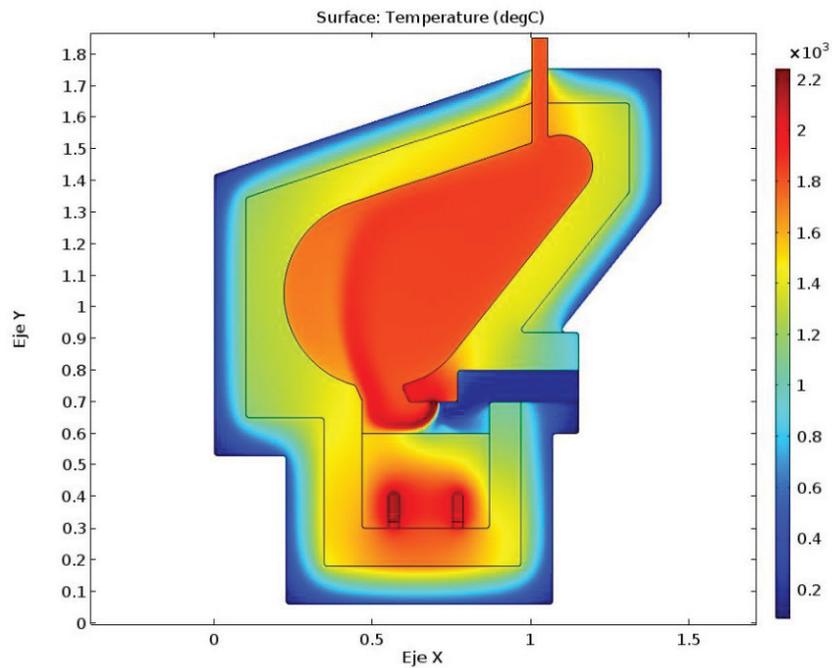


Figura 7. Resultados del campo de temperatura en la configuración 16 para todo el dominio.

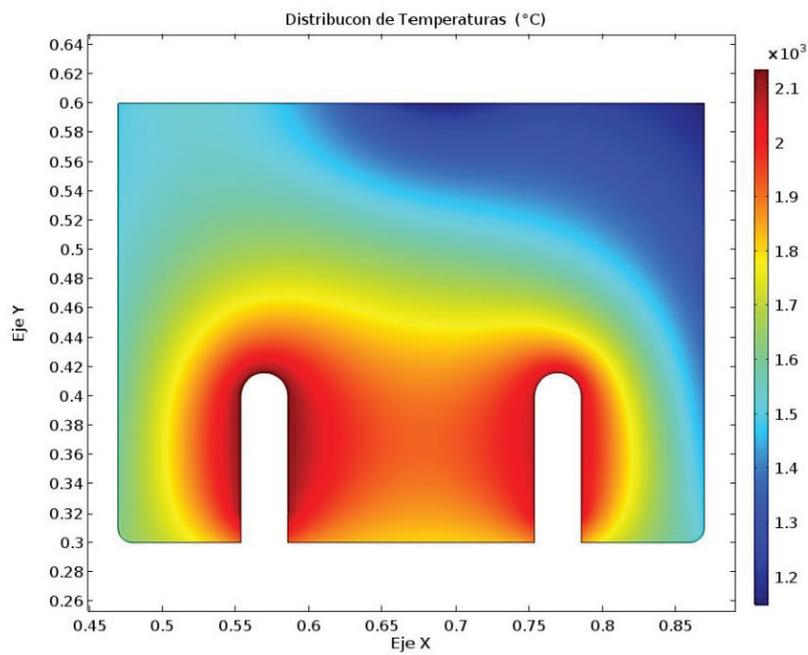


Figura 8. Resultados del campo de temperatura para el dominio del fundido en la configuración 16.

Para el dominio del fundido, el análisis se centra en el hecho de que el material debe alcanzar temperaturas de alrededor de 1200 °C, para lograr establecer una viscosidad menor a 10 Pa s. Así, el fundido podrá fluir por si solo fuera de la cámara. Para lograr esto último se incluyeron dos regiones de calentamiento simulando electrodos de fundición, práctica muy común en la industria de fundición de vidrio.

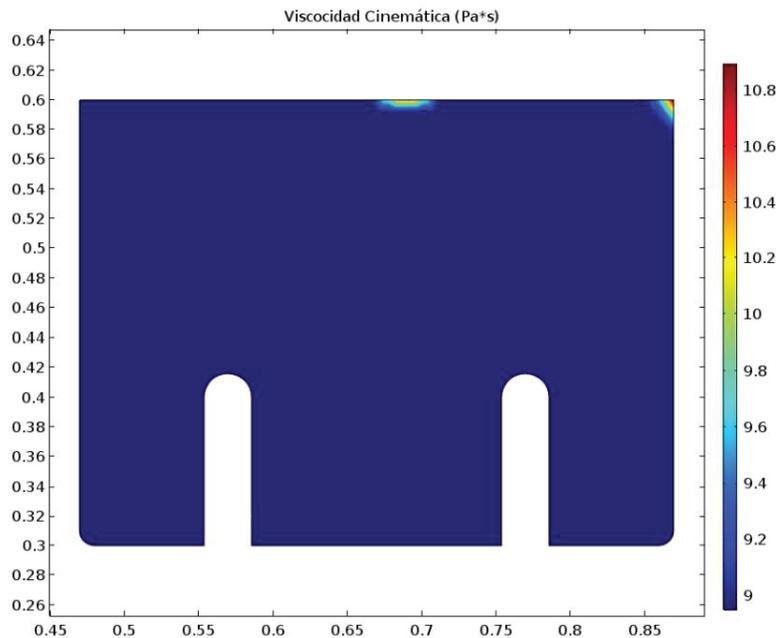


Figura 9. Resultados del campo de viscosidad para el dominio del fundido.

En la Figura 8 se muestra como el fundido alcanza temperaturas mayores a 1200 °C en todo el dominio, lo que permite afirmar que el material se encontrará a una viscosidad centrada en 10 Pa s en general, y específicamente con su mayoría de volumen en viscosidad menores a 9,2 Pa s como se observa en la Figura 9. Nótese de igual forma la uniformidad, lo cual es un resultado deseado para evitar solidificación y atascamiento.

Conclusiones

Con base en lo evidenciado en la sección de resultados y discusión, se pueden obtener las siguientes conclusiones respecto a la optimización de la geometría del reactor:

Se establece que la configuración 9 del diseño experimental desarrollado maximiza el mezclado de los gases con un indicador de razón de velocidades de 0,213.

Se establece que la configuración 16 minimiza la transferencia de calor hacia el ambiente con un indicador de temperaturas igual a 1,180.

Se establece que la configuración 9 del diseño experimental brinda el mejor desempeño en cuanto a la relación de mezclado y pérdidas de calor hacia el exterior con un indicador Beta de 0,245.

El diseño propuesto y su condición de operación permiten transferir la energía necesaria al material inorgánico para lograr su fundición y alcanzar una distribución de temperatura mínima de 1200 °C, lo cual permite alcanzar el equilibrio termodinámico de las reacciones químicas propuestas en el modelo cinético.

El campo de temperaturas de las simulaciones obtenidas, indica que el suministro de calor debido a las antorchas y electrodos de fundición permiten alcanzar viscosidades en el material fundido menores a 10 Pa s, lo cual permite su flujo hacia el exterior de la cámara de fundición.

Referencias

- [1] Q. Zhang, L. Dor, A. Biswas, W. Yang y W. Blasiak, «Modeling of steam plasma gasification for municipal solid waste.,» *Fuel processing technology*, n° 106, pp. 546-554, 2013.
- [2] V. Vargas y S. Tallents, «Determinación del potencial y los requerimientos para aplicar la tecnología de gasificación por plasma en el tratamiento de desechos y la producción de energía eléctrica en el país.,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2012.
- [3] J. Heberlein y A. Murphy, «Thermal plasma waste treatment,» *Journal of physics D: Applied Physics*, vol. 41, n° 5, p. 053001, 2008.
- [4] S. Ravelli, A. Perdichizzi y G. Barigozzi, «Description, applications and numerical modelling of bubbling fluidized bed combustion in waste-to-energy plants.,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, n° 2, pp. 224-253, 2008.
- [5] C. Ryu, Y. Yang, V. Nasserzadeh y J. Swithenbank, «Thermal reaction modeling of a large municipal solid waste incinerator,» *Combustion Science and Technology*, vol. 176, n° 11, pp. 1891-1907, 2004.
- [6] C. Ryu y S. Choi, «3-dimensional simulation of air mixing in the MSW incinerators,» *Combustion Science and Technology*, vol. 119, n° 1-6, pp. 155-170, 1996.
- [7] C. Ryu, D. Shin y S. Choi, «Combined simulation of combustion and gas flow in a grate-type incinerator,» *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 52, n° 2, pp. 189-197, 2002.
- [8] C. Goddard, Y. G. J. Yang, V. Sharifi, J. Swithenbank, J. Chartier y S. Moseley, «Optimization study of a large waste-to-energy plant using computational modelling and experimental measurements.,» *Journal of the Energy Institute*, vol. 78, n° 3, pp. 106-116, 2005.
- [9] S. Janssens, *Modeling of heat and mass transfer in a areactor for plasma gasification using a hybrid gas-water torch*, 2006.
- [10] S. Mashayak, *CFD modeling of plasma thermal reactor for waste treatment*, 2009.
- [11] E. Gómez, D. Rani, C. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise y A. Boccaccini, «Thermal plasma technology for the treatment of wastes: a critical review,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, n° 2, pp. 614-626, 2009.
- [12] H. Huang y L. Tang, «Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology,» *Energy Conversion and Management*, vol. 48, n° 4, pp. 1331-1337, 2007.
- [13] D. Orr y D. Maxwell, «A comparison of gasification and incineration of hazardous wastes,» 2000.
- [14] F. Fabry, C. Rehmet, V. Rohani y L. Fulcheri, «Waste gasification by thermal plasma: a review,» *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, n° 3, pp. 421-439, 2013.
- [15] W. Yang, H. Nam y S. Choi, «Improvement of operating conditions in waste incinerators using ingeneering tools,» *Waste Management*, vol. 27, n° 5, pp. 604-613, 2017.
- [16] M. Miltner, A. Makaruk, M. Harasek y A. Friedl, «Computational fluid dynamic simulation of a solid biomass combustor: modelling approaches,» *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 10, n° 2, pp. 165-174, 2008.
- [17] C. Vega-Sánchez, «I-Plare Reactor 1: Diseño y Simulación de un Reactor para Gasificación por Plasma,» Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago , 2016.
- [18] F. Rojas-Pérez, «I-Plare Reactor 1: Diseño y Simulación de un Reactor para Gasificación por Plasma,» Escuela de Física. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2017.
- [19] L. Barillas-Mora, «I-Plare Reactor 1: Diseño y Simulación de un Reactor para Gasificación por Plasma,» Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2016.
- [20] D. Wilcox, «Turbulence Modeling for CFD,» *DCW Industries*, pp. 11-170, 1998.

Estrategia de manejo de residuos sólidos para la comunidad de Colorado Norte, Pococí

Solid waste management strategy for the community of Colorado Norte, Pococí

Maryan Hidalgo-Vargas¹, Lilliana Abarca-Guerrero², Ariana Solís-Blandón³

Fecha de recepción: 3 de agosto, 2022

Fecha de aprobación: 29 de noviembre, 2022

Hidalgo-Vargas, M; Abarca-Guerrero, L; Solís-Blandón, A.
Estrategia de manejo de residuos sólidos para la comunidad de Colorado Norte, Pococí. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 50-64.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6352>

1 Ingeniera Ambiental. Costa Rica. Correo electrónico: mar95.varg@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7285-7394>

2 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Química, docente e investigadora. Correo electrónico: labarca@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5129-3104>

3 Ingeniera Ambiental. Costa Rica. Correo electrónico: arianasolb@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7285-7394>

Palabras clave

Manejo de residuos sólidos; reciclaje; gestión rural; transporte; disposición final; Colorado Norte.

Resumen

La comunidad de Colorado Norte ubicada en Pococí, no cuenta con un servicio de gestión integral de residuos. Este artículo plantea los pasos seguidos para el análisis de la situación de la comunidad y propone una estrategia de gestión de residuos sólidos que permita la valorización de los residuos. Para lograr lo anterior, se realizó un estudio de generación y composición de residuos sólidos y la aplicación de entrevistas a la comunidad, de esta manera se lograron identificar los principales problemas asociados a la gestión de residuos sólidos a los que se enfrentan. Se proponen cuatro objetivos estratégicos para mejorar la situación. Ellos son: Gestión de residuos en la fuente de generación, Recolección y transporte de los residuos sólidos, Educación, capacitación y sensibilización y Fortalecimiento legal y administrativo. Se concluye además que el índice de generación de residuos en la comunidad es de 0,51 kg/habitante/día, la implementación del servicio de recolección tendría un costo de aproximadamente 45 765,85 colones por trimestre/contribuyente (70 US\$), se propone que los residuos orgánicos sean dispuestos en los terrenos de los pobladores, y el resto recolectado puerta a puerta. La implementación de un sistema en la comunidad de Colorado Norte representa un reto muy grande debido a que es una zona de difícil acceso.

Keywords

Solid waste management; recycling; rural management; transportation; final disposal; Colorado Norte.

Abstract

The community of Colorado Norte, located in Pococí, does not have an integral waste management system. This article reports the steps followed to analyze the present situation of the community and proposes a solid waste management strategy that allows to have an improved system. In order to achieve the objectives of the study, the generation and composition of the solid waste were investigated. Interviews to community members were carried out in order to identify the main problems associated with the solid waste system. Four strategic objectives are proposed to improve the situation. They are: waste management at the source of generation, collection and transportation of solid waste, education, training and awareness, and strengthening legal and administrative processes. It is concluded that the rate of waste generation in the community is 0.51 kg/inhabitant/day, the implementation of the collection service would have a cost of approximately 45,765.85 colones/per quarter/taxpayer (US\$70). It is proposed that organic waste be disposed of on the land of the residents, and the rest collected door to door. The implementation of a system in the North Colorado community represents a great challenge due to the difficulties of access the area.

Introducción

Los residuos sólidos constituyen un gran problema en la sociedad, ya que son el resultado de la mayoría de las actividades llevadas a cabo por el ser humano. Factores como el crecimiento poblacional y el consumismo han acrecentado la cantidad de residuos generados, provocando conflictos sociales, ambientales y económicos [1]. El inadecuado manejo de los residuos

representa un peligro debido a la generación de focos de contaminación que traen consigo la reproducción de vectores de enfermedades, sin dejar de lado los impactos que estos residuos presentan en los suelos y fuentes de agua superficial y subterránea [2].

Costa Rica no es la excepción a este problema, el Informe Nacional del Ambiente [3] indica que se generan aproximadamente 4000 toneladas de residuos sólidos por día, y la gestión de estos representa una de las grandes problemáticas presentes. En el país, la gestión integral de los residuos sólidos es una obligación de las municipalidades según la Ley 8839 para la gestión integral de residuos y el Código Municipal N°7794. Ellas tienen el reto de ofrecer un sistema efectivo y eficiente a los habitantes. Sin embargo, a menudo enfrentan problemas que superan su capacidad para resolverlos, principalmente debido a la falta de organización, recursos financieros, y la complejidad y multidimensionalidad del sistema [4]. Además poseen limitaciones en el sistema de recolección, dado que no se tiene un 100% de cobertura en el territorio, lo que implica que las personas tengan que disponer sus residuos de una forma no segura al ambiente [5].

Los países en transición y emergentes poseen regiones periurbanas y rurales, donde se disponen residuos a cielo abierto debido a la falta de un sistema de gestión de residuos eficiente y efectivo, ya sea por distancias a la municipalidad responsable de los residuos, por asuntos financieros, entre otros. Con frecuencia, estos sitios de eliminación incontrolados se encuentran en la proximidad de hogares y cuerpos de agua, siendo estos vertederos una fuente de contaminación al aire, agua, suelo y fauna amenazando la salud pública [6].

Las zonas rurales en Costa Rica no son una excepción a lo que sucede en otras latitudes. Este es el caso del distrito de Colorado, ubicado en el cantón de Pococí, donde el servicio de recolección de residuos sólidos es inexistente ya que la zona es de difícil acceso y el gobierno local no cuenta con el recurso económico y humano necesario para ofrecer el servicio [7]. Como resultado, los vecinos optan por otros métodos para la disposición final de sus residuos, tales como quemas ilegales, enterramientos y descargas en el río Colorado [8].

Esta situación puede ser mejorada mediante la implementación de un sistema de gestión integral de residuos sólidos (SGIR), en donde se busquen soluciones integrales, para lograr metas y objetivos específicos para el manejo adecuado de ellos en un área geográfica específica, con el objetivo de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población [2].

Este artículo reporta la investigación realizada en la zona de estudio, donde se analiza la situación actual de la gestión de residuos sólidos, se determinan los impactos ambientales y se proponen soluciones para reducirlos, mejorando así las condiciones existentes.

Marco teórico

El rápido crecimiento poblacional, el aumento de la generación per cápita de residuos y la falta de terrenos convenientemente situados para la disposición de estos, representan un reto para la gestión de los residuos sólidos (RS). En general, el inadecuado manejo de los residuos sólidos es uno de los problemas ambientales que ocasiona más preocupación en los países en desarrollo, donde los servicios suelen ser muy deficientes, especialmente en las comunidades alejadas de las zonas urbanas, principalmente debido a la distancia [9].

Uno de los primeros elementos en la gestión de residuos sólidos es la recolección, donde las municipalidades enfrentan dificultades debido a las diferencias entre regiones geográficas, ciudades e incluso dentro de una misma ciudad. Brindar un servicio de recolección eficiente requiere una combinación de técnicas y equipos, para adaptarse a los diferentes desafíos que pueden tener las comunidades dentro de una misma región [9].

Una de las consecuencias de una mala recolección de residuos es la acumulación de ellos, que genera focos de contaminación dentro de espacios geográficos que resultan de gran importancia tanto para el desarrollo económico, como social de los distintos países y que trae consigo la reproducción de vectores de enfermedades tales como ratas, cucarachas e insectos, que afectan la salud pública [2].

Según Abarca y Lobo [5] en nuestro país existe aproximadamente un 23% de fugas diarias (residuos no recolectados), lo cual se debe en gran medida a que las rutas de recolección se extienden únicamente a sectores de fácil acceso.

En Costa Rica, la palabra “Residuo” se define como un material sólido, semisólido, líquido o gaseoso, cuyo generador o poseedor debe o requiere deshacerse de él, y que puede o debe ser valorizado o tratado responsablemente o, en su defecto, ser manejado por sistemas de disposición final adecuados según la Ley 8839 de Gestión Integral de Residuos del 2010 [10].

Además, en la mencionada ley se propone que la gestión integral de residuos sólidos es un conjunto articulado e interrelacionado de acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para el manejo de los residuos, desde su generación hasta la disposición final. Esto quiere decir que se busca comprometer a las instituciones públicas y privadas, así como a la población en general desde el inicio con la generación en la fuente hasta la disposición final (reciclaje, compost, entre otros) [2].

Metodología de la investigación

La investigación se llevó a cabo en la comunidad de Barra del Colorado Norte, perteneciente al distrito de Colorado, ubicado en el cantón de Pococí en la provincia de Limón. El lugar cuenta con aproximadamente 1000 habitantes distribuidos en 200 viviendas, de acuerdo con el registro de abonados de la Asociación Administradora del Sistema de Acueductos y Alcantarillados local (ASADA) que brinda el servicio de agua potable.

Esta comunidad cuenta con 2 centros educativos, 1 iglesia y 3 comercios pequeños. Es una zona de difícil acceso, puesto que se debe utilizar transporte terrestre y acuático para llegar a ella. La ruta de recolección se inicia en Guápiles, por medio de transporte terrestre hasta el embarcadero de Puerto Lindo, cuya distancia es de aproximadamente 54 km, de los cuales, al menos un 70% corresponde a caminos de lastre; posteriormente, se debe tomar transporte acuático, el cual tarda aproximadamente 1 hora en llegar a Barra de Colorado. La comunidad de Barra del Colorado Norte se encuentra totalmente rodeada por el río Tortuguero.

En la Figura 1 se muestra la ubicación del distrito:

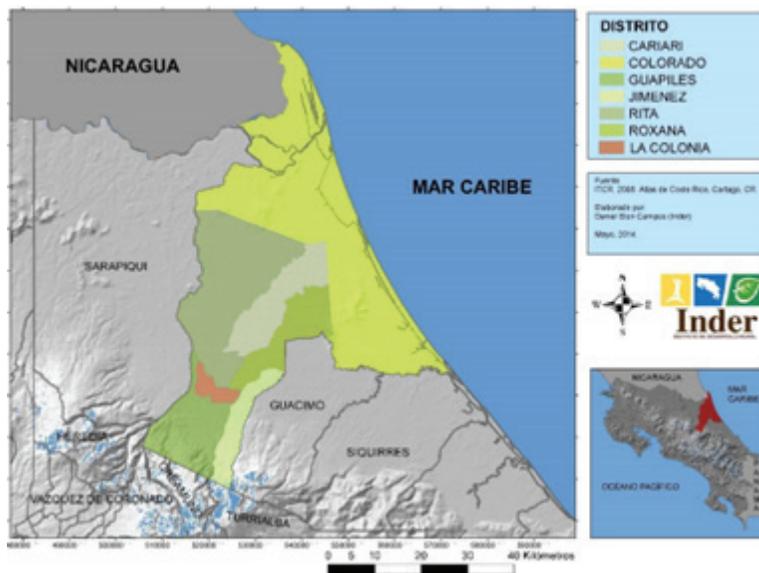


Figura 1. Ubicación del distrito de Colorado. (Tomado de Inder, 2021).

Para lograr el objetivo de la formulación de una guía de de gestión integral de residuos sólidos para la comunidad de Colorado Norte, se utilizaron varias fuentes de información siendo ellas las siguientes:

1. Se llevó a cabo un estudio de generación y composición de residuos sólidos del sector residencial, siguiendo la Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios [11]. Se definió una muestra de 19 viviendas de la comunidad las cuales se seleccionaron aleatoriamente. El análisis de los residuos se realizó en el Plantel Municipal de la Municipalidad de Pococí, en un espacio techado donde se determinó el peso por categoría en una báscula digital. Las categorías utilizadas fueron las siguientes tipos de residuo: orgánico, papel y cartón, plásticos valorizables, plástico no valorizable, vidrio, aluminio/hojalata, textiles, tetra pak/tetra brik, sanitarios, ordinarios no valorizables (sin plásticos).
2. Se aplicaron 25 entrevistas al sector residencial, donde se consideraron preguntas relacionadas el número de habitantes de la vivienda, prácticas de separación de residuos, cantidad de residuos generada, frecuencia de disposición de los residuos, prácticas de disposición final de residuos, disponibilidad para participar de capacitaciones y disponibilidad para el traslado de materiales valorizables al centro de acopio existente, pero en desuso.
3. Para la propuesta de una estrategia para la gestión integral de residuos sólidos, se utilizó la metodología del marco lógico, con el propósito de identificar problemas, causas y efectos en las condiciones de vida de los habitantes de la comunidad. Se realizó un análisis de involucrados, un árbol de problemas y objetivos, identificación de resultados y actividades de mejora.
4. Para la implementación de un modelo de cobro, se procedió a identificar los costos asociados a la recolección, transporte y disposición final de cada tonelada de residuos sólidos según el sistema planteado. Se consideran costos directos aquellos asociados a: mano de obra y cargas sociales de los funcionarios (operarios), depreciación, mantenimiento y reparación de los equipos de trabajo, materiales y suministros, pago por disposición final y tratamiento de los residuos, seguros y permisos de circulación de los vehículos, servicios públicos y compra de equipo. Con respecto a los costos indirectos, se tomaron en cuenta únicamente gastos administrativos y de suministros de limpieza.

Resultados y discusión

Estudio de generación y composición de residuos sólidos

Se determinó que la generación per cápita diaria de la comunidad es de 0,51 kg/habitante/día. En cuanto a la composición se determinó que las tres fracciones mayoritarias corresponde a residuos sanitarios, la mayoritaria con un 47,9%, seguida por residuos orgánicos con un porcentaje de 29,6% y un 5,6% de plásticos no valorizables (Ver Figura 2).

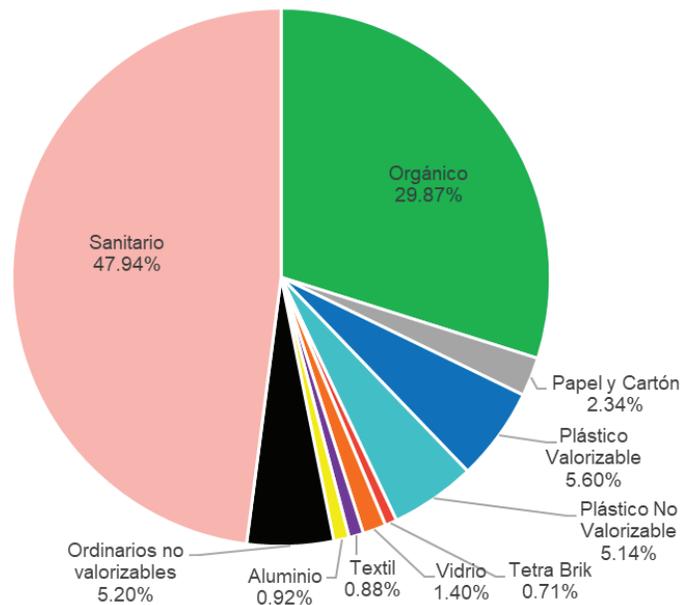


Figura 2. Composición porcentual de residuos sólidos en la comunidad de Colorado Norte.

En el Cuadro 1 se reportan los residuos contabilizados en 19 viviendas durante una semana, según su categoría. A partir de estos datos se crea una proyección semanal para las 200 viviendas existentes en la comunidad.

Cuadro 1. Proyección semanal de residuos sólidos generados según su categoría.

Categoría	Residuos contabilizados para 19 viviendas (kg/semana)	Proyección de residuos para 200 viviendas (kg/semana)
Sanitario	120	1263
Orgánico	74	779
Plástico valorizable	14	148
Ordinarios no valorizables (sin plástico)	13	137
Plástico no valorizable	13	137
Papel y cartón	6	63
Vidrio	4	42
Aluminio	2	21
Textil	2	21
Tetra pak/tetra brik	2	21
TOTAL	250	2632

*Residuo sanitario: Papel higiénico, toallas sanitarias y pañales.

Como se muestra en la figura anterior, los residuos sanitarios representan un 47,94% del total de la masa, siendo la mayor fracción. Seguido de la categoría de orgánicos, plástico valorizable, ordinarios no valorizables, plástico no valorizable, papel y cartón, vidrio, aluminio, textil y por último Tetra Pak.

Es importante destacar, que se encontraron mascarillas para la prevención del COVID-19, sin embargo, se catalogaron como un residuo ordinario puesto que en Costa Rica no existe una declaratoria oficial por parte del Ministerio de Salud para considerarlo como residuo infectocontagioso.

Durante el estudio, se determinó que la municipalidad tiene la intención de apoyar el mejoramiento del centro de recuperación de residuos sólidos existente, pero en desuso. El interés es enfocarse inicialmente en el aprovechamiento de residuos plásticos, metálicos, polilaminados, Tetra Brik, papel y cartón debido a las oportunidades de comercialización.

El Cuadro 2 muestra una proyección a 5 años, de los residuos valorizables obtenida en el estudio de composición y utilizando la población actual y distintos porcentajes de recuperación. Los valores que se presentan se basan en la idea de un aumento del porcentaje de recuperación de residuos, debido a la educación ambiental brindada y la habilitación del centro de acopio municipal.

Cuadro 2. Proyección a cinco años de los residuos valorizables recolectados mensualmente (kg/mes).

Año	1	2	3	4	5
% de recuperación	25%	30%	40%	60%	80%
Plástico	148	177	236	354	472
Papel y cartón	63	74	99	148	197
Vidrio	42	44	59	88	118
Aluminio	21	29	39	58	77
Tetra Brik	21	22	30	45	60
TOTAL	290	346	463	693	924

Entrevistas al sector residencial

Mediante la aplicación de entrevistas al sector residencial se determinó lo siguiente con respecto a la muestra utilizada:

1. Las familias están compuestas en su mayoría por 3 personas.
2. El 52% de las familias no realizan ningún tipo de separación de residuos, mientras que un 40% afirma separar sus residuos, pero no entregarlos para que sean reciclados.
3. De los residuos separados, un 92% corresponde a residuos orgánicos que son utilizados para alimentar animales y abonar plantas.
4. El 44% de los vecinos generan aproximadamente una bolsa de residuos sólidos a la semana.
5. El 52% de ellos se deshace de sus residuos semanalmente, mientras que un 24% lo hace diariamente.

6. Como principales prácticas de tratamiento o disposición final se identificaron quemar (76%), pagar a alguien para que los disponga (20%) y tiraderos a cielo abierto (12%).

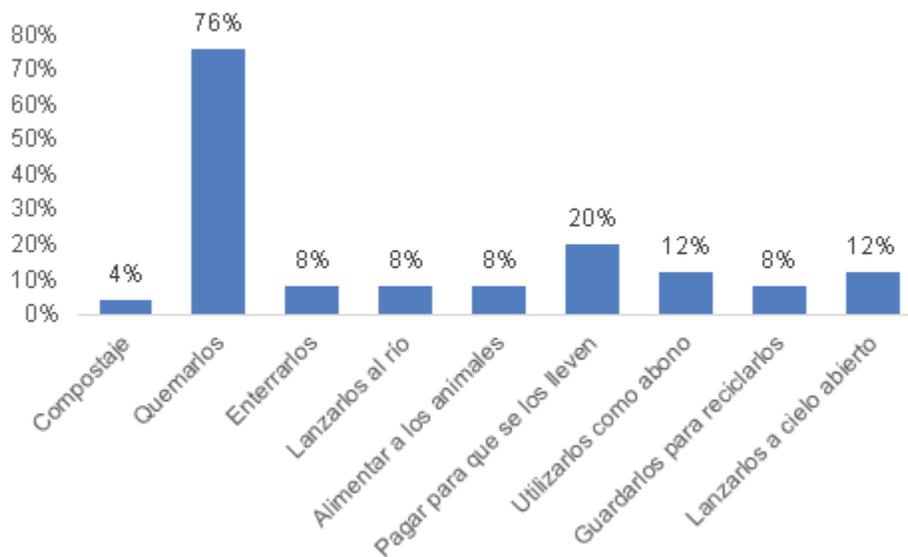


Figura 3. Disposición de los residuos sólidos generados en las viviendas de Colorado Norte.

7. El 88% de los vecinos está dispuesto a participar en capacitaciones sobre compostaje y gestión de residuos sólidos, mientras que un 12% se niega por falta de interés o de tiempo.
8. En caso de habilitarse el centro de acopio de la comunidad, un 92% de los vecinos está dispuesto a trasladar sus residuos valorizables hasta el lugar, mientras que un 8% los entregarían únicamente si son recolectados en la puerta de su hogar.

Posterior a los análisis anteriores se realizó un análisis FODA con el objetivo de preparar un Plan de Gestión para la comunidad de Colorado Norte.

Los resultados obtenidos del análisis de composición y las entrevistas a la comunidad y otros actores, permitió elaborar un análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) para una estrategia de manejo de residuos sólidos de la comunidad de Colorado Norte, así como analizar los aspectos que pueden afectar negativamente el proceso. Para este análisis se tomaron en cuenta las etapas de generación, almacenamiento, recolección, transporte, valorización y disposición final de los residuos.

Fortalezas	Oportunidades
<p>Un gran porcentaje de los residuos generados son biodegradables.</p> <p>Existencia de un centro de acopio en la comunidad.</p> <p>Se cuenta con una lancha municipal para el desplazamiento de los residuos.</p> <p>Obligatoriedad de la gestión de los residuos de la comunidad por parte de la municipalidad.</p> <p>El 40% de los vecinos separa los residuos y el 8% los entregan para el reciclaje</p> <p>La mayoría de los vecinos separa los residuos orgánicos.</p> <p>El 88% de los entrevistados asegura que estaría dispuesto a recibir capacitación en temas de reciclaje y compostaje</p> <p>El 92% de los vecinos entrevistados se mostraron entusiastas y dispuestos a trasladar sus residuos valorizables hasta el centro de acopio.</p>	<p>Apertura de mercado de reciclaje y compostaje.</p> <p>Existencia de un marco legal que hace responsable a la municipalidad de la gestión de los residuos sólidos de la comunidad.</p> <p>El 20% de los vecinos paga a alguien para que se deshaga de sus residuos.</p>
Debilidades	Amenazas
<p>No existe el servicio de recolección de residuos.</p> <p>La comunidad es de difícil acceso y lejana al sitio de disposición final.</p> <p>Los pobladores no poseen escritura de finca o formalización de construcciones ante la municipalidad.</p>	<p>Contaminación de los recursos naturales.</p> <p>Riesgos a la salud humana por la mala disposición de RS.</p> <p>Riesgo de inundaciones por la obstrucción de canales causada por la mala disposición de residuos.</p> <p>Deterioro de espacios públicos y paisaje visual.</p>

Figura 4. Análisis FODA del manejo de residuos en la comunidad.

Con base en el análisis realizado se propone la siguiente Estrategia de Manejo Integral de Residuos Sólidos para la comunidad de Colorado Norte. Este contiene elementos claves para la implementación de un sistema de recolección de los residuos generados, y así, reducir los impactos ambientales y los riesgos a la salud pública asociados, con el fin de mejorar la calidad de vida de los vecinos. En la Figura 5 se plantean las metas a alcanzar con la implementación de la estrategia plan.

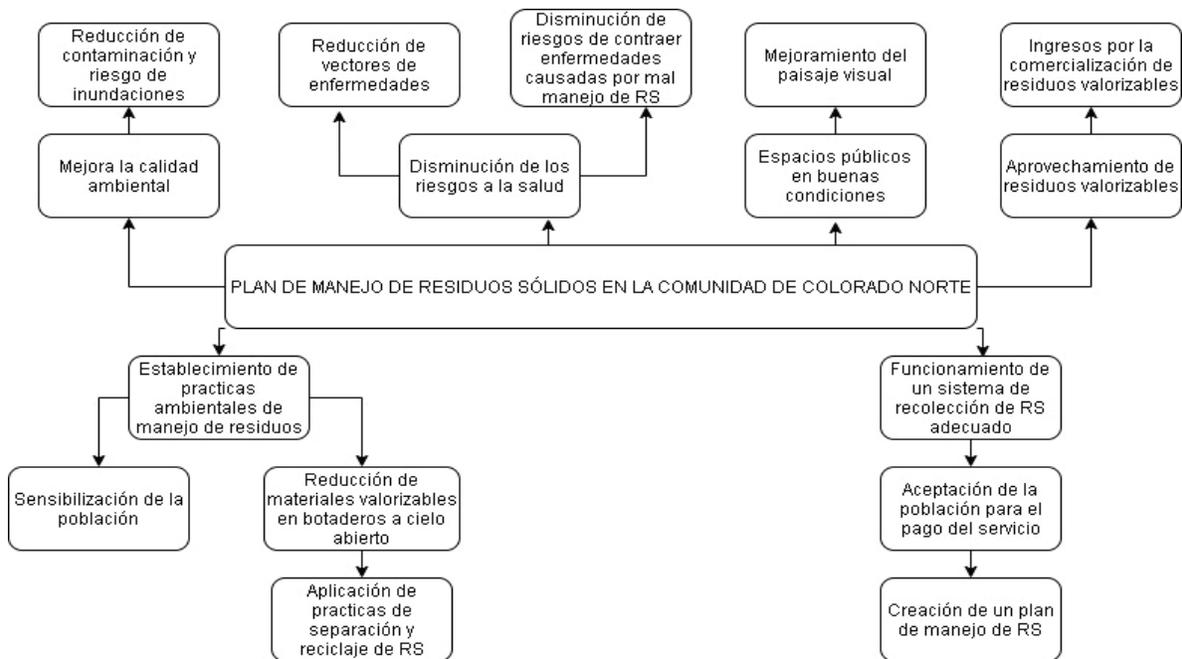


Figura 5. Metas por alcanzar con la implementación de una Estrategia de Manejo de RS en la comunidad de Colorado Norte.

Basado en el análisis anterior, se establecen 4 objetivos principales. Ellos son:

1. Mejorar la calidad ambiental
2. Embellecer el aspecto visual de espacios públicos
3. Disminuir los riesgos asociados a la salud
4. Aprovechar los materiales valorizables

Para el cumplimiento de estos, se deben establecer acciones por medio de líneas estratégicas, algunas de ellas son:

- Lograr que la población se apropie de la estrategia, para que este sea sostenible y funcional. Para ello se debe sensibilizar y capacitar a diferentes sectores de la comunidad.
- Impulsar a la comunidad a realizar la separación de los residuos sólidos en la fuente, al menos en dos grupos: residuos valorizables y residuos no valorizables, esto con el fin de aprovechar los materiales que puedan ser reciclados y comercializados y así mismo disminuir la cantidad de residuos a ser trasladados al relleno sanitario.
- Brindar un servicio de recolección y transporte de residuos sólidos en condiciones seguras, sanitarias y conforme lo establece la legislación actual vigente.
- Contar con el apoyo municipal es de suma importancia, ya que son los responsables legales de brindar el servicio de recolección y disposición de los residuos generados, así como de la asignación presupuestaria del proyecto.

Con respecto a las actividades planteadas, se proponen las siguientes líneas estratégicas:

1. Gestión de residuos en la fuente de generación
2. Recolección y transporte de residuos sólidos
3. Educación, capacitación y sensibilización

4. Fortalecimiento legal y administrativo

A continuación, se detalla cada una de las líneas estratégicas a tomar en cuenta con sus respectivos objetivos y actividades:

Línea estratégica 1. Gestión de residuos en la fuente de generación

Objetivo: Prevenir y gestionar los residuos en la fuente de generación.

Responsable: Municipalidad de Pococí como responsable. Colaboración por parte de la Asociación de Desarrollo, el sector local educativo y el futuro encargado del centro de acopio.

Actividades a desarrollar:

- Preparar una estrategia de compostaje doméstico
- Entregar a las familias que estén dispuestas a realizar la separación, dos recipientes: uno para materiales valorizables y otro para materiales no valorizables.
- Desarrollar un conjunto de indicadores para medir la eficiencia y eficacia del sistema de gestión de residuos.
- Reactivar el centro de acopio, donde se recibirán, clasificarán y almacenarán los residuos de manera eficiente y segura.
- Definir una figura encargada de administrar el centro de acopio.

Línea estratégica 2. Recolección y transporte de los residuos sólidos

Objetivo: Recuperar la mayor cantidad de residuos para su posterior reciclaje.

Responsable: Municipalidad de Pococí. Colaboración de la empresa privada de recolección de residuos.

Actividades a desarrollar:

- Establecer el tipo de sistema de recolección, dadas las características de la comunidad.
- Explicar a la comunidad el sistema de recolección de residuos no valorizables, horarios, rutas, frecuencia, tarifa, haciendo énfasis en la importancia de separar los residuos valorizables y trasladarlos al centro de acopio para su aprovechamiento. Así como dar a conocer el hecho de que el costo del servicio se vincula a la cantidad de residuos a manejar, quiere decir, que cuanto mayor sea la recuperación de materiales para su reciclaje, menores serán las tarifas por el servicio.
- Construir un sitio adecuado para el almacenamiento de residuos sólidos.
- Contratar una empresa encargada del transporte de los residuos desde Puerto Lindo al centro de disposición final más cercano. Se propone implementar un programa de recolección selectiva, esto significa que debe haber una clasificación en la fuente generadora, por lo tanto, se necesita concientizar y capacitar a la población para asegurar que la mayoría de los residuos sean aprovechados. Este tipo de recolección consiste en que la misma población separa los residuos en secos (materiales reciclables) y húmedos (materia orgánica), luego el servicio se brinda en días alternados para residuos secos y húmedos. En el caso de Colorado Norte, el sistema planteado solamente se encargará de la recolección de los residuos secos o bien que cada familia traslade sus residuos secos al centro de acopio. Para la recolección se propone un cuadraciclo adaptado con canasta, y un carrito para las viviendas en cuyos sectores este no pueda realizar el ingreso, los recolectores trasladarán los residuos desde las casas hasta el sitio de almacenaje. Este

método asegura la accesibilidad a la mayoría de los residuos valorizables generados. Los residuos orgánicos pueden ser manejados in situ por el amplio espacio que se identificó existe en la mayoría de viviendas.

- Los residuos se recolectarán semanalmente y se llevarán a un punto de almacenaje y cada quince días se trasladarán en lancha hasta Puerto Lindo, donde se colocarán en un camión recolector que los llevará al sitio de disposición final más cercano.
- Preparar una estrategia de compostaje doméstico.
- Entregar a las familias que estén dispuestas a realizar la separación, dos recipientes: uno para materiales valorizables y otro para materiales no valorizables.
- Desarrollar un conjunto de indicadores para medir la eficiencia y eficacia del sistema de gestión de residuos.
- Reactivar el centro de acopio, donde se recibirán, clasificarán y almacenarán los residuos de manera eficiente y segura.
- Definir una figura encargada de administrar el centro de acopio

Línea estratégica 3. Educación, capacitación y sensibilización

Objetivo: Establecer un plan participativo con representantes de la comunidad y del municipio.

Responsable: Municipalidad de Pococí. Colaboración de Asociaciones de Desarrollo, el Sector educativo y los líderes comunitarios.

Actividades a desarrollar:

- Desarrollar un programa educativo para la reducción, separación, reutilización y reciclaje, este incluye: identificación de los grupos a capacitar, definir los objetivos a alcanzar mediante la participación comunitaria.
- Fortalecer la capacidad de los líderes comunitarios de diferentes sectores para lograr una planificación y ejecución participativa.
- Propiciar la participación de empresas privadas de la región dedicadas al acopio, reciclaje, etc.
- Analizar qué tanto conocimiento tiene la población en el tema de manejo de residuos, ello permitirá definir objetivos reales.
- Promover la separación de residuos en los hogares.
- Inculcar principios de respeto al ambiente.

Línea estratégica 4. Fortalecimiento legal y administrativo

Objetivo: Establecer una normativa municipal que permita mejorar las condiciones actuales y el control de estas para beneficio de la comunidad.

Responsable: Municipalidad de Pococí.

Actividades a desarrollar:

- Dar a conocer a la comunidad el Reglamento de Manejo de residuos sólidos del cantón de Pococí para alcanzar la gestión y manejo integral de residuos en la comunidad.
- Aplicar el reglamento municipal, que garantice el control y funcionamiento de la gestión y manejo integral de los residuos sólidos.
- Asignar presupuesto.

- Contratar a una empresa que sea la responsable de la gestión y manejo en forma integral de los residuos, se establece como prioridad que esta unidad cumpla con lo establecido en la Ley 8839, el Reglamento de Manejo de Residuos Ordinarios N°36093 (Art. 29 al 31 referente a condiciones de transporte de residuos) y el Código de Trabajo en cuanto a condiciones laborales de los colaboradores.
- Crear un Comité de Gestión de Residuos que tenga la responsabilidad de controlar la eficiencia del servicio.
- Establecer un costo tarifario por el servicio prestado acorde a los costos reales del servicio conforme al artículo 83 del Código Municipal.
- Establecer e implementar un plan de gestión financiera para el funcionamiento del sistema de gestión de residuos presente y futuro.
- Diseñar un sistema de control para monitorear los gastos relacionados con el sistema de gestión de residuos.

A manera de resumen la Figura 6 muestra el modelo de recolección propuesto.

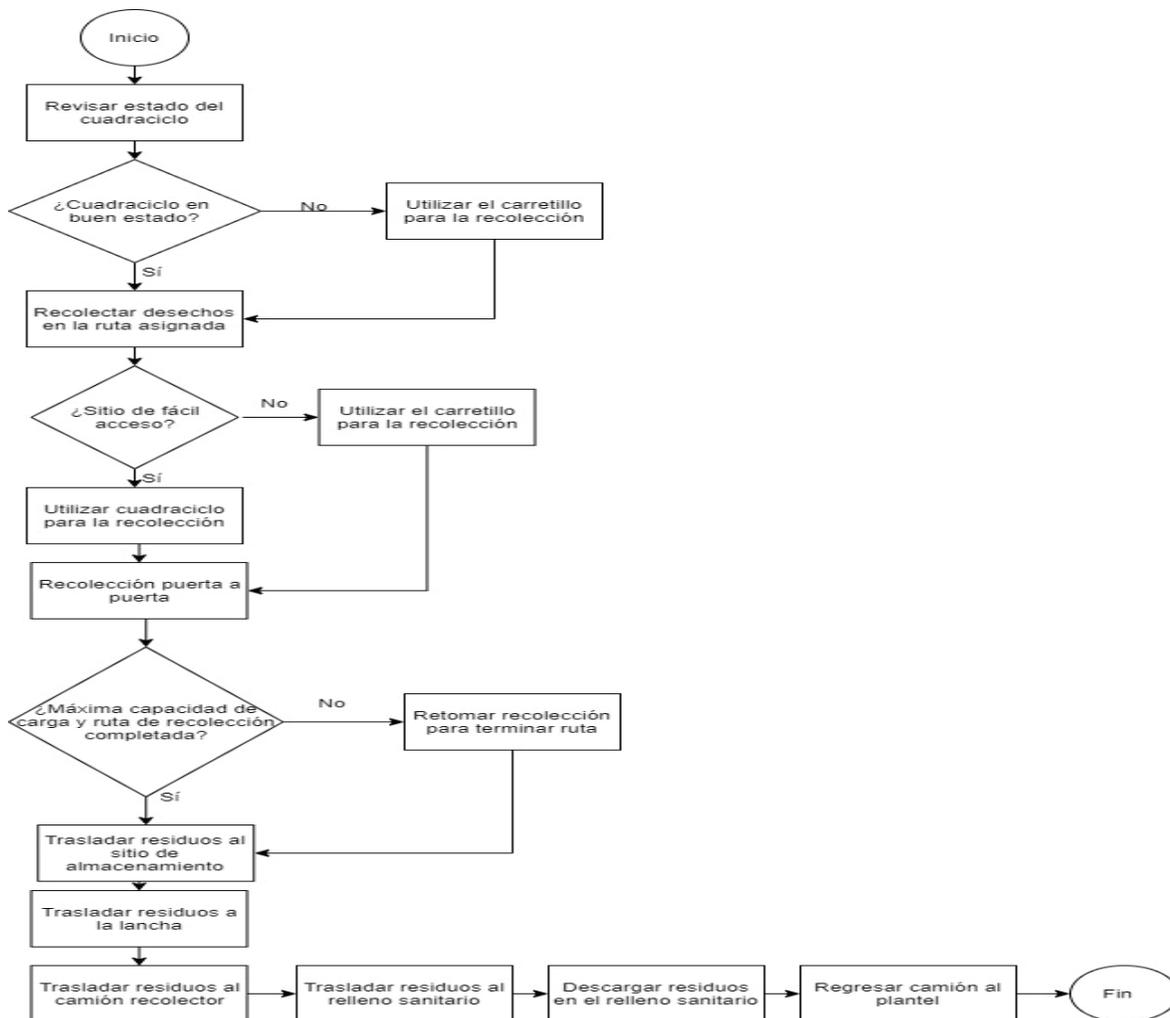


Figura 6. Diagrama de proceso de recolección de residuos propuesto.

Conclusiones

- En estudios similares realizados en el cantón, los residuos orgánicos representaban la mayor fracción en los estudios de generación y composición de residuos sólidos, sin embargo, en este estudio se determinó que la mayor fracción correspondía a residuos sanitarios (47,9%), esto se debe en gran medida a que en días anteriores a la recolección de la muestra llovió y por lo tanto se acumuló humedad en los residuos como pañales y toallas sanitarias.
- En este estudio se determinó que el índice de generación per cápita de la comunidad de Colorado Norte es de 0,51 kg/habitante/día menor que el promedio del país (0,7 kg/habitante/día).
- Según las encuestas realizadas, un 76% de la población opta por la quema de sus residuos sólidos, lo que contribuye a la contaminación del aire, de suelos y fuentes de agua por medio de las cenizas.
- Con base a los resultados obtenidos, se seleccionó para la comunidad de Colorado Norte una estrategia que promueva la participación social activa y la jerarquización de residuos y de acciones, lo que permite reducir el monto por concepto de disposición de los residuos en el relleno sanitario, ya que se pretende incentivar propuestas de reducción y eliminación de los residuos desde la fuente generadora. Si se contempla el tratamiento de los residuos orgánicos como primer enfoque del sistema, el costo de disposición de los residuos puede llegar a disminuir hasta en un 30% debido al volumen de generación de este tipo de residuo en la comunidad.
- Según el análisis de estimación de costos realizado, se determinó que la implementación de un servicio de recolección de RS en la comunidad de Barra del Colorado tendría un costo de aproximadamente 45.765,85 colones por trimestre/contribuyente (hasta un 76% más costoso que en el resto del cantón de Pococí debido a las limitaciones de lejanía con respecto al sitio de disposición final y el transporte pluvial de los RS).
- En cuanto a la recolección de residuos, en las zonas rurales y con escasa conciencia ambiental, se ha reportado, que lo ideal es hacerlo con un sistema puerta a puerta, ya que se obtienen mejores resultados en términos de recolección selectiva que los modelos basados en colocación de contenedores en sitios fijos.
- La implementación de un sistema de gestión de residuos sólidos en la comunidad de Colorado Norte representa un reto muy grande debido a que es una zona de difícil acceso y no posee su propio sitio de disposición final de residuos.

Referencias

- [1] Masís-Leandro, K. J. (2018). Centros municipales de recuperación de residuos sólidos valorizables en Costa Rica: situación actual y guía de buenas prácticas. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/10008>
- [2] Anchía Leitón, D. (2018). Propuesta para el diseño de micro-rutas de recolección de residuos sólidos valorizables en el casco central comercial de la ciudad de San José. <https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/14572>
- [3] Consejo Nacional del Ambiente. (2017). Informe Estado del Ambiente Costa Rica 2017. <https://odd.ucr.ac.cr/sites/default/files/JAE2017/00-Estado-del-Ambiente-ResumenEjecutivo-vf.pdf>
- [4] Abarca-Guerrero, L., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management Journal*, 33, 220-232, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008>
- [5] Abarca, L. y Lobo, S. (2020). Análisis de mercado de los residuos sólidos ordinarios, sus subproductos y evaluación del costo-beneficio de las tecnologías disponibles en residuos valorizables que pueden dar una oportunidad de negocio. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, San José, Costa Rica.

- [6] Constantin, F. (Ed.). (2017). Solid Waste Management in Rural Areas. <http://dx.doi.org/10.5772/66551>
- [7] Bernache Pérez, G. (2015) La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales, Sociedad y Ambiente, (7). doi: 10.31840/sya.v0i7.1592.
- [8] Municipalidad de Pococí. (2015). Plan de Desarrollo Rural Territorial de Pococí 2015-2020. Recuperado de <http://obturcaribe.ucr.ac.cr/documentos-publicaciones/planes-yprogramas-n/inder/192-pdrt-pococi/file>
- [9] Shahmoradi, B. (2013). Collection of municipal solid waste in developing countries. En International Journal of Environmental Studies (Vol. 70, Número 6). <https://doi.org/10.1080/00207233.2013.853407>
- [10] Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2010). Ley para la Gestión Integral de Residuos, N°8839.
- [11] Ministerio de Salud. (2013). Decreto Ejecutivo N° 37745-S Oficializa la Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios. San José, Costa Rica.

Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara promedio en invernadero

Reference evapotranspiration, actual
evapotranspiration and crop coefficient for onion
(*Allium cepa*) c.v. Alvara average in greenhouse

Adrián Enrique Chavarría-Vidal¹, Mario Morales-
Sánchez², Freddy Soto-Bravo³

Fecha de recepción: 6 de junio, 2022
Fecha de aprobación: 3 de octubre, 2022

Chavarría-Vidal, A.E; Morales-Sánchez, M; Soto-Bravo, F.
Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real
y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*allium*
cepa) c.V. Álvara promedio en invernadero. *Tecnología en*
Marcha. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 65-77.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6240>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica – Universidad Nacional – Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. Correo electrónico: adchavarría@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1647-8212>
- 2 Profesor jubilado. Costa Rica. Correo electrónico: mario.morales@ucr.ac.cr
- 3 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental. Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Costa Rica. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Palabras clave

Evapotranspiración de referencia; consumo de agua; evapotranspiración real; cebolla; invernadero; recurso hídrico; coeficiente del cultivo.

Resumen

La necesidad de conocer el consumo de agua que un cultivo tiene en el transcurso de su periodo vegetativo sea este anual o perenne, es fundamental debido al cambio climático en desarrollo el cual manifiesta tanto una baja en la cantidad de agua precipitada en diferentes zonas de nuestro país como una concentración de estas precipitaciones. Además, es necesario ser eficiente y eficaz en el uso del recurso hídrico para riego en la agricultura tanto en ambientes abiertos como protegidos y por medio de ello, procurar el desarrollo sostenible. Para lograr esto, es menester conocer los valores de evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente del cultivo con el fin de estimar y proyectar aplicaciones de agua por medio de sistemas de riego lo más ajustadas a la realidad posible.

Por generaciones se ha utilizado valores del coeficiente del cultivo independientemente del método matemático de estimación de la evapotranspiración de referencia sin conocer si existen diferencias o no en los resultados obtenidos en los consumos de agua estimados. No obstante, por medio de métodos matemáticos de estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando datos de la humedad relativa, temperatura y radiación solar dentro de un invernadero, se encontró diferencia significativa en los valores del coeficiente del cultivo. En las metodologías de Ivanov y Camargo no se encontró diferencia significativa entre ellos pero si se encontró diferencias significativas (0,05) con respecto a las metodologías de Benavidez, Linacre, Hargreaves y Turc; las metodologías de Benavidez y Linacre presentaron diferencias significativa (0,05) tanto entre ellos y como con respecto a las metodologías de Ivanov, Camargo, Hargreaves y Turc; y Hargreaves y Turc no presentaron diferencia significativa entre ellos pero si se encontró diferencias significativas (0,05) con respecto a las metodologías de Ivanov, Camargo, Benavidez y Linacre.

Keywords

Reference evapotranspiration; water consumption; actual evapotranspiration; onion; greenhouse; hidric resource; crop coefficient.

Abstract

The need to know the water consumption of a crop during its vegetative period, be it annual or perennial, is fundamental due to the climate change underway, which manifests both a decrease in the amount of precipitation in different areas of our country and a concentration of this precipitation. In addition, it is necessary to be efficient and effective in the use of water resources for irrigation in agriculture, both in open and protected environments, and thus to strive for sustainable development. To achieve this, it is necessary to know the values of reference evapotranspiration, actual evapotranspiration and crop coefficient in order to estimate and project water applications through irrigation systems as close to reality as possible.

For generations, crop coefficient values of a crop have been used independently of the mathematical method of estimating reference evapotranspiration without knowing whether or not there are differences in the results obtained in the estimated water consumptions. However, by means of mathematical methods for estimating reference evapotranspiration using data on relative humidity, temperature and solar radiation inside a greenhouse, a significant difference

in crop coefficient values was found. The methodologies of Ivanov and Camargo did not show significant differences (0,05) with respect to the methodologies of Benavidez, Linacre, Hargreaves and Turc; the methodologies of Benavidez and Linacre presented significant differences (0,05) both among them and with respect to the methodologies of Ivanov, Camargo, Hargreaves and Turc; and Hargreaves and Turc did not present significant differences among them but significant differences (0,05) were found with respect to the methodologies of Ivanov, Camargo, Benavidez and Linacre.

Introducción

Ante el cambio climático que manifiesta para nuestro país disminución de las precipitaciones anuales en algunas áreas juntamente con concentración de dichas precipitaciones de lo cual, se esperan impactos económicos; se hace menester en la producción agrícola un manejo de recurso hídrico de manera eficiente, eficaz, racional y en armonía con el ambiente. No obstante, el sector agrícola es el segundo mayor consumidor de agua principalmente para la producción de alimentos [1]. Lo anterior nos conlleva a la necesidad de aplicar el agua que realmente necesitan los cultivos sin desperdicio ni falta de dicho recurso y para lograr este objetivo se necesita medir el consumo.

Usualmente para la estimación de los consumos de agua de los siembras se utiliza la evapotranspiración del cultivo (Etc) en los diseños y operación de sistemas de riego, y aplicaciones de la estimación del recurso hídrico en general. Ésta se calcula mediante el producto de la evapotranspiración de referencia (Eto) la cual se estima a través de diferentes ecuaciones o modelos matemáticos y variables ambientales que se multiplica por un coeficiente del cultivo (Kc) normalmente tomado de informaciones teóricas provenientes de diferentes latitudes, suelos, climas, regiones y otros, con respecto a nuestra localidad [2]. Ante esta situación, no se sabe si los resultados obtenidos son correctos. Como tal, se necesita conocer si existe diferencia en los resultados de estimación de los consumos de agua y en el caso de ser positivo, nos indicaría que el procedimiento realizado para dichas estimaciones debe ser corregido.

La evapotranspiración de referencia consiste en una extensa superficie de grama en crecimiento activo, cubriendo totalmente el suelo, con una altura de entre 8 y 15 cm de altura, con índice de área foliar de alrededor de 3, sin restricciones hídricas y con un amplio borde para evitar la advección de calor sensible de áreas adyacentes. La evapotranspiración en estas condiciones depende principalmente de las variables meteorológicas por lo que la Eto es una variable meteorológica que expresa el potencial de evapotranspiración para las condiciones meteorológicas vigentes [3]. Por ello para la estimación de la evapotranspiración potencial se usan principalmente variables ambientales como radiación solar, temperaturas máximas, mínimas, medias y amplitud de estas, humedad del aire, viento, presión atmosférica y otros.

Evapotranspiración del cultivo (Etc) es la que se presenta en el crecimiento y desarrollo de este sin restricciones hídricas, en condiciones óptimas de crecimiento con un borde ampliado para evitar una advección de calor sensible proveniente de áreas adyacentes. Como es el resultado del producto de la evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo, es una estimación de un consumo de agua la cual no necesariamente es ajustada a la realidad del consumo de agua [4].

Evapotranspiración real (Etr) es la que se presenta en las mismas condiciones que la evapotranspiración potencial en un cultivo específico, pero con o sin restricciones hídricas la cual, viene a ser lo que realmente se consume de agua por parte de éste debido a la suma de los dos efectos que son la evaporación y la transpiración [5]. Esta no se estima, sino que se mide por algún método directo o indirecto y en términos de riego eficiente para la producción,

se procede a regresar únicamente lo que se consumió de agua. Para lograr una medida de manera correcta se parte de un suelo que se encuentra a capacidad de campo real donde las plantas se encontrarán siempre en el rango de agua fácilmente disponible [6].

El coeficiente del cultivo depende del tipo, la fase de crecimiento, el estado de crecimiento y las condiciones climáticas predominantes. Representa la evapotranspiración para condiciones de cultivo óptimas de forma de que estos logren su potencial productivo y que estén sometidos a un manejo agronómico apropiado a las condiciones del medio a un manejo del agua que evite el estrés [7]. Además, el K_c debe ser determinado para las condiciones locales en las cuales será utilizado [8].

Metodología

Para el desarrollo de la investigación de la existencia o no de diferencias significativas entre los diferentes k_c provenientes de métodos de estimación de la E_{to} según las variables meteorológicas que se usen, se escogió el cultivo de cebolla. Éste cultivo, es de ciclo corto y alta densidad de siembra que presenta un grosor de suelo como mínimo de 20 cm de profundidad donde las raíces son tiernas, finas, poco ramificadas y bien provistas de pelos absorbentes en tercio medio inferior donde: Usualmente, 15 días antes de la bulbificación la cantidad de raíces se duplica y hasta se triplica en los primeros 20 cm de profundidad, lo cual indica; que es un periodo crítico para el suministro de agua para procurar una buena producción de bulbos. [9]. También se reporta que el cultivo de cebolla tiene su profundidad de raíces efectivas de los 10 cm a los 20 cm [10].

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago; específicamente en un invernadero ubicado Patalillo (Barrio Fátima) con una altura de 1600 msnm, precipitación de 2299,8 mm al año en promedio, temperatura promedio de 16,5 °C, brillo solar promedio de 4,3 horas al día y humedad relativa promedio del 88 % [11].

No se sembró en el suelo del invernadero de manera directa debido a que se encontraba protegido con “cover” de color negro y por ello se utilizaron canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto llenas con suelo franco de origen volcánico (andisol) mezclado con graba fina y arena con origen calcáreo (un tipo de sustrato). En las canastas se logró una altura de suelo total de 20,00 – 23,00 cm para un total máximo de 44,00 l de suelo. El riego se realizó con un sistema por goteo el cual dotó de 7,80 l h⁻¹ a cada canasta que contó con 12 plantas sembradas. Estos 7,80 l h⁻¹ se aplicó por medio de 6 goteros donde cada una de ella corresponde a un gotero de 1,30 l h⁻¹ distribuidas uniformemente en cada una de las canastas. Se sembró el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara para establecer el experimento entre 4,50 y 5,00 meses de periodo del cultivo, para los cuales se contó con 4 tratamientos, a saber 4 diferentes rangos de succión de humedad del suelo (partiendo al inicio cuando se realiza el trasplante del cultivo de cebolla) del punto de capacidad de campo de la siguiente manera:

1. Tratamiento 1, Testigo con 4 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 5 a 15 centibares
2. Tratamiento 2 con 3 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 15 a 25 centibares
3. Tratamiento 3 con 4 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 25 a 35 centibares
4. Tratamiento 4 con 3 repeticiones: rango de succión de agua en el suelo de 35 a 45 centibares

El invernadero tiene 30,00 m de largo y 11, 50 m de ancho para un área total de 345 m². Se establecieron camas por medio de la unión de canastas en la disposición espacial de 4 canastas a lo ancho y 16 canastas a lo largo de cada cama, para un total de 64 canastas por cama. A lo largo del invernadero se establecieron 14 camas donde se presentó un gran total de 896 canastas dentro del invernadero. El número total de plantas fue de 10752 como máximo.

Cada canasta tiene rendijas grandes en las paredes y en el fondo por lo que se necesitó “cover” perforado para no perder el suelo, pero con orificios para el drenaje y la aireación de esta. No obstante, el suelo estuvo en succión según los tratamientos y en estas condiciones no existió drenaje.

Se colocó un tensiómetro mecánico por tratamiento para tener el control del riego bajo succión juntamente con tensiómetros eléctricos en todas las repeticiones de los tratamientos. Se tomaron datos temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR) con el objetivo de estimar la evapotranspiración potencial por diferentes métodos conforme los datos obtenidos lo permitan.

Existen varias unidades de radiación las cuales se relacionan entre sí y se pueden proporcionar constantes de conversión y fórmulas. La conversión de unidades es relativamente simple el cual es un proceso matemático, sin embargo, cuando se usan estos factores de conversión, contiene error tanto de conversión como de medición donde la incertidumbre asociada con la conversión de unidades de radiación de fuentes de tipo genérico utilizando los factores de conversión es menos del 10%. La conversión de PAR a radiación solar (Rs) utiliza los fotones a diferentes longitudes de onda que tienen diferentes energías, por lo que se debe saber tanto el número de fotones por unidad de longitud de onda en cada longitud de onda y la energía por fotón en cada longitud de onda para calcular la energía total. Este es un proceso complejo que se ha simplificado a la división por una constante conocida. [12].

$$Rs \left(\frac{W}{m^2} \right) = \frac{PAR \left(\frac{\mu mol}{m^2 * s} \right)}{4,98} \dots \dots \dots ec 1$$

$$Rs \left(\frac{mm}{d} \right) = 0,0353 * Rs \left(\frac{W}{m^2} \right) \dots \dots \dots ec 2$$

$$PAR \left(\frac{Mj}{m^2 * d} \right) = \frac{PAR \left(\frac{\mu mol}{m^2 * s} \right) * t \left(\frac{s}{d} \right)}{1000000} \dots \dots \dots ec 3$$

[13]

La radiación solar en el tope de la atmósfera por unidad de área y tiempo tiene un valor promedio de 1367 W (m²)⁻¹ la cual se define como la constante solar y tiene una variación alrededor del 1,5% a través del año [14].

La evapotranspiración potencial se estimó por diferentes métodos como se muestran a continuación:

El método de Hargreaves y Samani [15] requiere de menor cantidad de parámetros de entrada para estimar la evapotranspiración potencial permitiendo obtener la evapotranspiración potencial de una manera más simple.

$$Eto = 0,408 * \left[0,0023 * Ra * (Tmed + 17,8) * \sqrt{(Tmax - Tmin)} \right] \dots \dots \dots ec 4$$

donde:

Eto = Evapotranspiración potencial (mm d⁻¹)

Tmax = temperatura máxima diaria del aire (°C)

Tmin = temperatura a mínima diaria del aire (°C)

Tmed = temperatura media diaria del aire (°C)

Ra = radiación en el tope de la atmósfera (MJ (m²*d)⁻¹)

También puede utilizarse la siguiente expresión variando las unidades de Ra [16]:

$$Eto = 0,0023 * Ra * (Tmed + 17,8) * \sqrt{(Tmax - Tmin)} \dots \dots \dots ec 5$$

donde:

Ra = radiación en el tope de la atmósfera (mm d⁻¹)

Cuadro 1. Radiación solar extraterrestre en latitudes de ubicación de Costa Rica en diferentes unidades.

Radiación extraterrestre (Ra) de latitud norte en milímetros equivalentes por día (mm/d)												
Latitud	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
12	12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5
10	13.2	14.2	15.3	15.7	15.3	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9
8	13.6	14.5	15.3	15.6	15.0	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3
6	13.9	14.8	15.4	15.4	14.7	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7

Radiación solar extraterrestre (Ra) de latitud norte en MJ/(m ² *d)												
Latitud	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
12	30.9	33.8	36.5	38	38	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30
10	31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31
8	32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32
6	33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9

Tomado de [17].

Equivalencias de conversión de unidades

$$\# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right) = 0,408 * \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{\text{mm}}{h} \right) = 0,001469 * \# \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} \right) = 2,45 * \# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right)$$

$$\# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right) = 8,64 * \# \left(\frac{l}{s * ha} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{l}{s * ha} \right) = 0,1157 * \# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right)$$

$$\# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right) = 0,1 * \# \left(\frac{\text{m}^3}{ha * d} \right) \quad \circ \quad \# \left(\frac{\text{m}^3}{ha * d} \right) = 10 * \# \left(\frac{\text{mm}}{d} \right)$$

$$\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} = 0,0864 * \# \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right) \quad \circ \quad \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * h} = 0,0036 * \# \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right)$$

$$\frac{W}{\text{m}^2} = 11,5741 * \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * d} \right) \quad \circ \quad \frac{W}{\text{m}^2} = 27,7778 * \# \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 * h} \right)$$

$$1 \frac{J}{s} = 1 W$$

El método de Benavidez y López relaciona la evapotranspiración de referencia con la humedad relativa y la temperatura con la siguiente ecuación [18]:

$$Eto = 1,21 * 10^{\left(\frac{7,45 * t}{234,7 + t} \right)} * (1 - 0,01 * HR) + 0,21 * t - 2,30 \dots \dots \dots ec 6$$

Donde:

T = temperatura (°C)

HR = Humedad relativa (%)

El método de Camargo fue desarrollada analizando los resultados de la ecuación de Thornthwaite proponiendo una fórmula más simple, pero con la misma eficiencia en la evapotranspiración de referencia en periodos de 10 a 30 días. Este método utiliza la siguiente ecuación para estimar la Eto [19]:

$$Eto = 0,01 * Qo * T \dots \dots \dots ec 7$$

donde:

Qo = radiación solar global extraterrestre según el mes (mm evaporación equivalente día⁻¹)

T = Temperatura media del aire (°C)

ND = Número de días del período considerado

El método de Linacre utiliza la temperatura promedio del día, el porcentaje de humedad relativa, la elevación de la ubicación del estudio y la latitud en grados [20]

$$T_o = \frac{237,7 \left(\frac{17,27 * T_{med}}{237,7 + T_{med}} + \ln \left(\frac{\%HR}{100} \right) \right)}{17,27 - \left(\frac{17,27 * T_{med}}{237,7 + T_{med}} + \ln \left(\frac{\%HR}{100} \right) \right)} \dots \dots \dots ec 8$$

$$E_{to} = \frac{700 * \frac{(T_{med} + 0,006 * Z)}{(100 - L)} + 15 * (T_{med} - T_o)}{80 - T_{med}} \dots \dots \dots ec 9$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración (mm d⁻¹)

T_{med} = temperatura promedio (°C)

T_o = temperatura punto de rocío (°C)

Z = altura (msnm)

L = latitud (°)

$\%HR$ = porcentaje de la humedad relativa

El método de Turc para humedad relativa menores al 50% se utiliza la siguiente ecuación [21]:

$$E_{to} = 0,013 * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) * (R_s * 23,8846 + 50) * \left(1 + \frac{50 - \%HR}{70} \right) \dots \dots \dots ec 10$$

Para humedad relativa mayores al 50% se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{to} = 0,013 * \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) * (R_s * 23,8846 + 50) \dots \dots \dots ec 11$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración (mm d⁻¹)

T_{med} = temperatura promedio (°C)

R_s = radiación solar ($\frac{MJ}{m^2 * d}$)

El método de Ivanov utiliza la temperatura media y el porcentaje de humedad relativa para estimar la evapotranspiración potencial [20]:

$$E_{to} = 0,006 * (25 + T_{med})^2 * \left(1 - \frac{\%HR}{100} \right) \dots \dots \dots ec 12$$

donde:

E_{to} = evapotranspiración (mm d⁻¹)

T_{med} = temperatura promedio (°C)

$\%HR$ = porcentaje de humedad relativa

La evapotranspiración real se mide con base en la ecuación del balance hídrico se tiene [22]:

$$Etr = \text{Agua entra} - \text{agua sale} \pm \text{agua en el suelo} \dots \dots \dots \text{ec 13}$$

donde:

Agua que entra: es el agua de lluvia o de riego o de capas superiores que llegan al área de estudio sea de manera superficial o subsuperficial (mm de agua) en un periodo de tiempo.

Agua que sale: es la que se pierde del suelo por percolación o por drenaje natural o por drenaje artificial y también la que sale por evapotranspiración (mm de agua) en un periodo de tiempo.

Agua en el suelo: es la variación del agua que queda en el suelo (mm de agua) en un periodo de tiempo.

Como el sistema experimental se encuentra en un ambiente protegido, el cual tiene un manejo del contenido de agua en el suelo que se suministra por el sistema de riego por goteo bajo un régimen de succión donde no se presentó drenaje y si se presentó la variación del contenido de agua en el suelo donde la ecuación del balance hídrico queda de la siguiente manera:

$$Etr = \text{Agua entra} \pm \text{agua en el suelo} \dots \dots \dots \text{ec 14}$$

$$Etr = I - \Delta S \dots \dots \dots \text{ec 15}$$

donde:

$Etr = T(\text{transpiración}) + E(\text{evaporación})$, es la evapotranspiración real del cultivo (mm) en un periodo de tiempo

I = dosis de riego (mm) en un periodo de tiempo

ΔS = cambio de humedad del suelo (mm) en un periodo de tiempo

Por lo anterior, no se medió diariamente el agua que drena y como tal no se tomó en cuenta en la ecuación del balance hídrico en el suelo de la canasta debido a que no existió porque la humedad del suelo estuvo en succión

La evapotranspiración real se midió en las parcelas del T1 donde se tuvieron las mejores condiciones de humedad presentes para el cultivo que fue donde se mantuvo una succión de agua en el suelo en el rango de 5 - 15 centibares

Coeficiente del cultivo

Este está definido por la relación matemática que existe entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real:

$$Kc = \frac{Etr}{Eto} \dots \dots \dots \text{ec 16}$$

Etr = evapotranspiración real (mm d⁻¹)

Eto = Evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹)

Kc = coeficiente del cultivo (adimensional)

Resultados

La estimación de la evapotranspiración potencial muestra (cuadro 2) una variabilidad en el consumo del recurso hídrico total del periodo del cultivo. Muestra los métodos de Turc y Hargreaves con los valores más altos y los métodos de Ivanov y de Camargo muestra los valores más bajos.

Cuadro 2. Evapotranspiración potencial del período total del cultivo de cebolla dentro del invernadero para los métodos que utilizan la humedad relativa, temperatura y radiación solar

Metodología	Consumo agua estimado en todo el periodo del cultivo (mm)
Hargreaves y Samani	1007,53
Benavidez y López	539,67
Camargo	504,89
Linacre	822,30
Turc	1097,14
Ivanov	487,33

Del cuadro 3 se puede observar que la evapotranspiración real que se presentó en todo el periodo del cultivo de cebolla es menor a todos los métodos utilizados en la estimación de la evapotranspiración potencial. No obstante, el método que más se acerca es el de Linacre.

Cuadro 3. Evapotranspiración real del período total del cultivo de cebolla sembrado en invernadero mantenido en un rango de presión de succión de 5 a 15 centibares (cb)

Etr = EvapoTranspiración Real	
	EtrT1(mmTot)
R1	451,5610
R2	432,7515
R3	471,7507
R4	453,9293

La evapotranspiración real como se muestra en el cuadro 3 presenta un promedio de 452,5 mm, varianza de 254,51 y un coeficiente de variación del 3,53 % los cuales presentan un comportamiento normal. En contraste con los datos estimados de la evapotranspiración potencial como se muestra en el cuadro 2, presenta un promedio de 743 mm, varianza de 73017 y un coeficiente de variación del 36,36 %. Podemos observar que a pesar de que los métodos utilizan variables meteorológicas semejantes, los resultados presentan variaciones importantes, posiblemente a que cada método fue establecido y calibrado en zonas diferentes en términos físico-atmosférico.

El coeficiente de cultivo promedio de toda la fase productiva de la cebolla (Fig. 1) sembrada en invernadero para los diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia mostró diferencia altamente significativa (P-value<0,01).

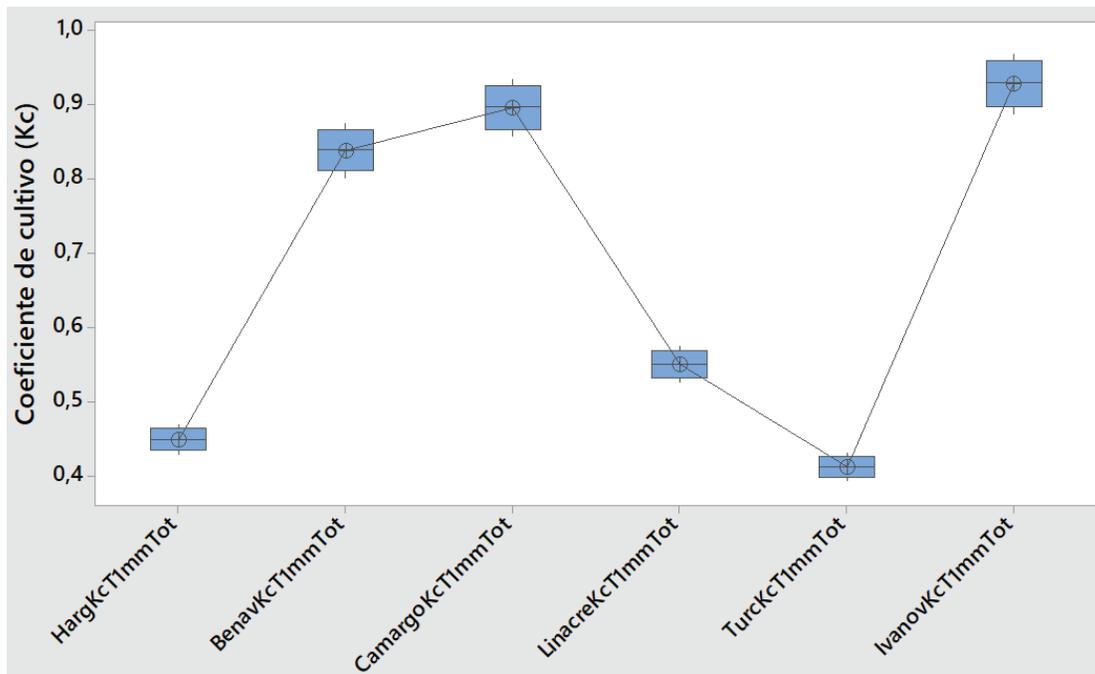


Figura 1. Variación de los diferentes Kc calculados para el cultivo de cebolla en invernadero

Como se muestra en el cuadro 4 con respecto a los valores de Kc y las diferentes ecuaciones para estimar la Eto, los métodos de Ivanov y Camargo no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) con respecto a Benavides, Linacre, Hargreaves y Turc. Los métodos de Hargreaves y Turc no mostraron diferencia significativa entre ellos, pero si mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) respecto a Ivanov, Camargo, Benavides y Linacre. Los métodos de Benavides y Linacre mostraron diferencia significativa (P-value <0,05) entre ellos y también con los métodos Ivanov, Camargo Hargreaves y Turc.

Cuadro 4. Agrupación de los Kc promedio para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero utilizando el método de Tukey al 95% de confianza

Factor	N	Media	95% CI	Grupo
IvanovKcT1mmTot	4	0,9285	(0,9022 - 0,9549)	A
CamargoKcT1mmTot	4	0,8962	(0,8699 - 0,9226)	A
BenavKcT1mmTot	4	0,8385	(0,8121 - 0,8648)	B
LinacreKcT1mmTot	4	0,55028	(0,52391 - 0,57666)	C
HargKcT1mmTot	4	0,44912	(0,42274 - 0,47549)	D
TurcKcT1mmTot	4	0,41244	(0,38606 - 0,43881)	D

Medias con diferentes letras presentan diferencias significativas.

Conclusiones

Existe diferencia significativa en los valores del Kc para el cultivo de cebolla sembrado en invernadero según el método que se utilice para estimar la evapotranspiración de referencia. Esto nos indica que los valores de Kc se deben de medir según el cultivo, las metodologías utilizadas para estimar la evapotranspiración de referencia y de las condiciones ambientales del sistema productivo. No obstante, estas diferencias se presentan a pesar de que las metodologías utilizadas emplean semejantes variables meteorológicas. Sin embargo, existen metodologías que muestran que el valor de la Eto es semejante a la Etc y son aquellas donde el Kc se acerca al valor de uno.

Lo anterior nos muestra que no existe método mejor o peor en la estimación del consumo del recurso hídrico por parte de un cultivo específico, sino que se deben de utilizar los Kc debidamente medidos para los ajustes correctos a la metodología utilizada para estimar la Etc y lograr un uso del recurso hídrico eficiente, eficaz y en términos de desarrollo sostenible con respecto al cambio climático.

Además, también nos indica que no se debiera utilizar indiscriminadamente cualquier valor de Kc encontrado en cuadros de diferente procedencia tanto a nivel geográfico como de condiciones del sistema productivo para estimar los consumos del recurso hídrico por parte de los cultivos en la operación y diseño de sistemas de riego, sino que se deben de utilizar los valores de Kc correspondientes para cada una de las metodologías de estimación de la Eto según sea el caso.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente , Energía y Telecomunicaciones Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*, San José, 2012, p. 1060.
- [2] H. P. Gomes, *Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética*, João Pessoa, Paraíba, 2013, p. 281.
- [3] L. R. Angelocci y P. C. Sentelhas, *Meteorologia Agrícola: Evapotranspiração Definições e Conceitos (Aula # 8)*, Piracicaba, São Paulo, 2012, p. 47.
- [4] Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Engenharia e Biosistemas, *Micrometeorologia de Sistemas Agrícolas: Evapotranspiração*, Piracicaba, São Paulo, S.f., p. 32.
- [5] A. . L. Profeta, *Estimativa da evapotranspiração real em área de relevo acidentado utilizando o SEBAL(Dissertação Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais)*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017, p. 80.
- [6] Universidad Autónoma de San Luis de Potosi. Centro de investigación y estudios de posgrad y área agrogeodésica., *Apuntes de la materia de riego y drenaje*, San Luis de Potosí, 2003, p. 164.
- [7] L. Santos Pereira, *Necessidades de água e de rega das culturas: uso de modelos*, Lisboa, Sf., p. 18.
- [8] O. D. Lopes, M. K. Kobayashi, F. G. Oliveira, I. C. A. Alvarenga, E. R. Martins y C. E. Corsato, «Determinação do coeficiente de cultura (Kc) e eficiência do uso de água do alecrim-pimenta irrigado,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 6, p. 6, 15 marzo 2011.
- [9] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), *Agrometeorología dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*, Brasília - DF, 2009, p. 530.
- [10] R. Testezlaf, *Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola.*, São Paulo, Sf..
- [11] E. d. J. Montenegro-Hernández, *Cartago*, Cartago, 2018, p. 507.
- [12] R. W. Thimijan y R. D. Heins , «Photometric, Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A Review of Procedures for Interconversion,» *American Society for Horticultural Science: HortScienc*, vol. 18, nº 6, pp. 818 - 820, 12 1983.
- [13] A. Rio, R. N. R. Sibaldelli, L. G. T. Crusiol, J. F. C. Carvalho, L. C. Ferreira, W. Neiverth, S. Procopio, A. Almeida, N. Neumaier, A. Nepomuceno y J. R. B. Farias, *VIII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja: Resumos expandidos*, P. Saiz-Melo, Ed., São Paulo, São Paulo: Embrapa, 2013, p. 217.

- [14] E. Dias de Freitas, *Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Ciências Atmosféricas, Agrometeorologia*, São Paulo: Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP, 2005, p. 153.
- [15] M. G. da Silva, I. d. S. Oliveira, F. F. do Carmo, E. R. F. Lêdo y J. A. da Silva Filho, «ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELA EQUAÇÃO DE HARGREAVES-SAMANI NO ESTADO DO CEARÁ, BRASIL,» *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, vol. 9, nº 2, pp. 132 -141, 8 6 2015.
- [16] G. Arcanjo Reis y M. Moreira de Souza, *UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS: Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados*, Dourados, Mato Grosso do Sul, 2019, p. 35.
- [17] A. E. Chavarría Vidal, *Apuntes de clases de Relación Suelo Agua Planta*, Cartago, Cartago, 2012, p. 203.
- [18] W. de Oliveira Santos, B. D. de Oliveira Batista, J. pinheiro de Assis, W. Martins Rodrigues y J. Espínola Sobrinho, «Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETO) para a Região de Mossoró-RN,» *Revista Verde (Mossoró – RN – Brasil)*, vol. 5, nº 5, pp. 210 - 221, 12 2010.
- [19] A. R. Pereira, L. R. Angelocci y P. C. Sentelhas, *Meteorología Agrícola*, 3era ed., Piracicaba, São Paulo, 2000, p. 180.
- [20] P. A. L. de Castro, G. O. Santos y R. G. Diniz, «Models for Estimating Reference Evapotranspiration in Different Periods in Rio Verde, Goiás, Brazil,» *Journal of Agricultural Science*, vol. 11, nº 18, pp. 63 - 75, 2019.
- [21] L. da Costa Santos, G. H. Terra Cruz, F. Freire Capuchinho, J. Vieira José y E. F. dos Reis, «Assessment of empirical methods for estimation of reference evapotranspiration in the Brazilian Savannah,» *Australian Journal of Crop Science*, vol. 13, nº 07, pp. 1094 - 1104, 24 07 2019.
- [22] . S. Martínez y M. Garbi, *Climatología y Fenología Agrícola; Evapotranspiración y balance hidrológico del suelo*, La Plata, 2020, p. 18.

Impact of Blockchain on Latin American healthcare systems

Impacto de Blockchain en los sistemas de salud latinoamericanos

Gabriel Silva-Atencio¹, Mauricio Umaña-Ramírez², Marian Valverde-Porras³

Fecha de recepción: 23 de mayo, 2022

Fecha de aprobación: 6 de septiembre, 2022

Silva-Atencio, G; Umaña-Ramírez, M. V; Valverde-Porras, M.
Impact of Blockchain on Latin American healthcare systems.
Tecnología en Marcha. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023.
Pág. 78-86.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6223>

- 1 Head of Chair in the Computer Engineering career. Latin American University of Science and Technology (ULACIT). Costa Rica. Email: gsilvaa468@ulacit.ed.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4881-181X>
- 2 Industrial Engineer, Doctor in Business Competitiveness and Economic Development. Catholic University of El Salvador. El Salvador.
Email: mauricio.umana@catolica.edu.sv
 <https://orcid.org/0000-0002-0733-5183>
- 3 Master's student and Associate Software Engineer. Latin American University of Science and Technology (ULACIT), SchoolMint. Costa Rica.
Email: mvalverdep037@ulacit.ed.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5338-8059>

Keywords

Blockchain; Internet of medical things; electronic health record; healthcare system; digitization.

Abstract

Advances in information technology are digitizing health areas to improve medical services, diagnoses, and continuous monitoring. These technologies have improved distributed systems' security, reliability, and robustness. This digitization enhances the ease of calculating, storing, and accessing medical records, enabling better patient treatment experiences. However, it risks cyber-attacks, security, and privacy issues for data. In this article, we propose a reliable model based on Blockchain and the Internet of Medical Things, allowing the patient to provide consent to obtain and the option to share their medical records, getting more incredible speed when scheduling a consultation or receiving a treatment. In a Post COVID-19 era, this can take the steps for new strategic policies that offer people a more competitive system of social benefit in health and one of many avenues that help the prosperity of citizens in a world in crisis.

Palabras clave

Blockchain; Internet de las cosas médicas; historia clínica electrónica; sistema sanitario; digitalización.

Resumen

Los avances en las tecnologías de la información están digitalizando las áreas sanitarias para mejorar los servicios médicos, los diagnósticos y el seguimiento continuo. Estas tecnologías han mejorado la seguridad, fiabilidad y solidez de los sistemas distribuidos. Esta digitalización facilita el cálculo, el almacenamiento y el acceso a los historiales médicos, lo que permite mejorar la experiencia de tratamiento de los pacientes. Sin embargo, entraña riesgos de ciberataques y problemas de seguridad y privacidad de los datos. En este artículo, proponemos un modelo fiable basado en Blockchain y el Internet de las cosas médico, que permite al paciente dar su consentimiento para obtener y la opción de compartir su historial médico, consiguiendo una velocidad más increíble a la hora de programar una consulta o recibir un tratamiento. En una era Post COVID-19, esto puede dar los pasos para nuevas políticas estratégicas que ofrezcan a las personas un sistema más competitivo de prestación social en salud y una de las muchas vías que ayudan a la prosperidad de los ciudadanos en un mundo en crisis.

Introduction

Advances in technology and science have facilitated the solution of various problems and have given rise to new developments to deal with other challenges where the means to address them did not exist. In this context, the problem arises in which the Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS) finds itself, which has an Expediente Digital Único en Salud (EDUS), where the medical records of each citizen are managed and where there is an excess of centralization, which makes the information very hermetic for said institution.

Currently, people expect instant and seamless access to their records when visiting any hospital in the country. Unfortunately, the EDUS system has fallen behind in meeting the expectations of its patients. Medical records are not easily accessible due to different standards and data formats, which means the medical ecosystem of each hospital is why it is not suitable for being instantaneous or for mobilization.

On the other hand, health systems provide better care, a supply chain, safety, and health, among other essential aspects for an institution in charge of social welfare. That said, vulnerabilities can be detected in the efficiency of a supply chain, from contacting the supplier at the cost of manufacturing the medicine to the final delivery to the user. Therefore, this research identifies how the delivery of these medicines could be improved, as well as optimizing doctor-patient appointments.

Among the advances in science and technology towards the problem raised is Blockchains, a tool that would help us meet the identified needs, transmitting health information across the farthest geographic and institutional boundaries to provide a suitable and secure management mechanism.

The main advantages of Blockchain are decentralization, security, transparency, and immutability of data. These allow information to be verified and value exchanged without relying on a third-party authority. Based on these benefits, one of the areas that this Blockchain technology will most impact is medical since electronic health records and records will be in a secure layer, difficult to be hacked [1].

The disruptive potential we want to show the Blockchain reader is its technology, which eliminates the need for an entity to manage, store, and finance a database.

On the other hand, in search of support for the decentralization and structure, both physical and digital, of the medical records of the fund, it is essential to mention the concept of the Internet of Medical Things (IoMT) in infrastructure areas and intercom. This is one of the most recent paradigms in the health field, which would help ensure patients' quality of life, carrying out medical processes efficiently and agilely.

This needs to be answered, given that the Costa Rican technological infrastructure is still being determined in the face of emerging technologies. The limitations presented by the current technology base in the health system for a possible application of Blockchain are studied.

This study aims to provide the benefits obtained by implementing Blockchains in the EDUS system, manage the integrity and privacy of the data and ensure the limitations when implementing IoMT in Costa Rican hospitals.

Literature review

Blockchain is a peer-to-peer (P2P) network that sits on the Internet. In 1991 the first publication on this technology was made with its proposal to create a digital registry. Still, it was not until 2008 that Bitcoin was born, a cryptocurrency that uses Blockchain technology to make electronic payments without the need for supervision by financial institutions [2].

Peer-to-peer is a network where each device shares its resources with every other device on the web. All the machines are directly connected to these networks and do not need a server device since their connection is direct. This type of network is a fundamental piece of Blockchain technology.

Blockchain technology is a secure record of historical transactions, collected in blocks, chained chronologically, and distributed across different servers, creating a trusted provenance [3]. A distributed database also maintains a continuously growing list of ordered records called the "blocks" [4].

Many believe Bitcoin and Blockchain are the same, but this is untrue. Around 2014, those who realized that Blockchain could be used for more than cryptocurrencies began to invest and explore how it could disrupt many operations. The Blockchain is an open, decentralized

ledger that permanently records transactions between two parties without needing third-party authentication. This creates a highly efficient process where transaction costs are predicted to reduce Field drastically[5].

It has always been common for companies and institutions to keep their information in books. The institutions that own these books control access to this information and, as such, can act as intermediaries when other interested agents need to consult and have access to the data [6]. The intermediary role can be presented because the information is private or needs to be validated by the institution.

When the information is in the hands of an institution, it becomes a “central authority,” an intermediary that has full access to the information and intervenes in all transactions. As Porxas and Conejero clarify, [6], we should not equate this “central authority” with a public authority, a credit institution, or a regulated entity. It is simply the term used in the works on this technology to identify the owner of the information in the traditional system based on trust, also called the “centralized” system.

The concept of Blockchain completely changes how information is stored and handled. Through an open-source internet protocol that allows for “decentralized” storage of data, the need for an intermediary or central authority to control storage and access to information is eliminated.

Blockchain technology, such as Distributed Ledger Technology (DLT), allows the creation of networks to share record books of electronic transactions, very similar to accounting books; or, in other words, shared digital databases [6]. The main differentiator is that the information is “distributed” among all the network members; therefore, no entity or institution owns the data.

Blockchains are a network or chain of computers (nodes) where each node has a complete copy of the information. In this way, each time the data stored on the network changes, a “block” is created.

Before any block can be added to the Blockchain network, it must go through a validation process where, using some computer algorithm, all nodes in the network must authorize the change in information. Validation processes differ for each Blockchain system, using either the Proof-of-Work or Proof-of-Stake method.

Proof-of-Work (PoW) and Proof-of-Stake (PoS) are consensus mechanisms, which means how the network validates the transaction and allows it to be added to the network.

In other words, the PoW method is a cryptographic algorithm network nodes use to validate a transaction. The nodes use their computational resources to solve the cryptographic algorithm, and when 51% of the nodes in the network solve the algorithm, the transaction is authorized. Also, the first node that manages to solve the cryptographic algorithm receives a reward, which differs for each Blockchain network. The PoS method is also a cryptographic algorithm, but unlike the previous one, it does not contemplate the existence of rewards for the node that validates the transaction.

The exercise of validating the transactions, the creation of the blocks, and their subsequent incorporation into the distributed registry are carried out by the so-called validator nodes [6]. When most nodes approve the transaction, the blockchain adds the block.

Each block has a unique time-stamped cryptographic hash or a condensed and converted version of a more extensive set of data (such as the characters in a password) into a set of smaller hashes, linking it to the previous block in the chain, e.g. Therefore, it is impossible to reorder the block retroactively. Information about partnerships cannot be retroactively altered because they are stored on multiple nodes across a distributed network; even if one node is

damaged, the others will have the correct version of the ledger. The data change does not delete the previous entry but instead creates a new block showing the changes; the last version of the data can always be seen by simply going back to the previous block [7].

With its decentralized and trustless nature, Blockchain technology can create new opportunities and benefit businesses through increased transparency, enhanced security, and a more accessible traceability [8]. Therefore, Blockchains are not limited to cryptocurrencies. There are many benefits that this technology can offer to different sectors.

One of the most essential attributes of Blockchain is that its database is open to the public. This forces the institutions involved to be more honest when doing business. In financial systems and businesses, this adds unprecedented accountability, making every sector accountable for acting with integrity toward the growth of the company, its community, and its customers [8].

In the same line as above, due to the decentralized nature of Blockchains, the intermediary can be eliminated and thus speed up information transactions. As Koksas describes, compared to traditional financial services, Blockchain facilitates faster transactions by allowing P2P cross-border transfers with a digital currency [8].

That is why each block is encrypted with complex algorithms; once the information is part of the network, it is almost impossible to decode. Similarly, blocks cannot be modified or deleted once added because they are immutable. Blockchains' immutable and uncorrupted nature makes them impossible proof of falsified information and hackers. Its decentralized nature also gives it the unique quality of being "trustless," meaning parties do not need trust to transact Field securely[8]. Each block in the chain has a timestamp and an association with its previous block. This makes it easy to see the transaction's origin and destination. Blockchain's security can show that the information it stores will be difficult to extract because the blocks are unalterable, and if a block is altered, it breaks its connection with the chain.

As Koksas asserts, this can help improve security and prevent fraud in exchange-related businesses, but also help verify the authenticity of the assets traded. In industries such as medicine, it can be used to trace the supply chain from manufacturer to distributor or, in the art industry, to provide irrefutable proof of ownership [8].

EDUS is the official application of the Costa Rican Social Security Fund, which allows citizens to access relevant information in their records through intelligent devices [9].

The benefits provided by EDUS are described below: It allows the user to consult the right to medical care, update their data without leaving home, consult the details about their prescribed medications, see the details of the next appointment, and schedule it on their smartphone. In the same way, the user can clarify doubts about diagnoses, and details of registered allergies, find out how many people are in his subsequent surgery, and keep track of it. In addition, you can easily switch users and access any of your associated dependents [9].

This allows you to carry out the ascription process at the health establishment that corresponds to you if you are direct insured. You can also access appointment data (previous and pending), request or cancel appointments between you and your family members at affiliated medical institutions, and finally, check the status of your insurance for medical health services and validate their insurance condition for access to medical services.

In case of having received medical attention in the establishments that have implemented the Unique Digital Health File, the insured can see the information related to the medications that have been prescribed, as well as the surgical route. Likewise, the user can view their medical information, such as appointments or scheduled surgeries and test results, among other information linked to the system, such as Disability, Old Age, and Death regimen.

If the user is a contributor, they have their pension estimate information, reported wages, and periods consolidated by employers. You can see your pension information, payments, and associated deductions if you are a pensioner. In both scenarios, you can see the operation details if you have a mortgage loan from the said regime. You can verify your rights to medical care even without carrying proof of ownership (employer order) or an insurance card [9].

One of the technologies that have come to change the paradigm of connectivity is the Internet of Things or also called by its name in English, IoT. This arises thanks to the number of devices (hardware and software) connected simultaneously and in real-time, sharing data through wireless features. Bernard Marr highlights the report published by Allied Market Research, where it is predicted that the market for IoT in the medical and health area will reach a net value of 136 billion US dollars by 2021 [10]. It is also essential to rescue the dimension introduced by Bernard Marr, establishing that, by 2025, 1.2 billion people will be very old, with the potential for this technology to take the health area to extremes that have not been explored by the world—human beings.

This definition provides a logical path to base the question of what IoMT is. It is highlighted that the IoMT is the medical area where IoT is applied in its purest form, and it is considered to be the set of medical and health devices connected to the Internet. From what can be concluded, it is a digital and physical infrastructure of health systems, where an entity in charge of health solves communication, efficiency, administration, and medical treatment needs.

IoMT supports the characteristic machine-to-machine (M2M) functionality. This is the ability of devices to exchange data and engage in sender-receiver communication. Such functionality favors the data transaction without needing a man in the middle (someone or some machine in the middle of the data transfer) that interferes with the communication. There is also the communication human-to-machine (H2M) and human-to-human (H2H), which are intrinsic characteristics of everyday computing that IoT and IoMT come to get better. It is important to emphasize that these functionalities: M2M, H2M, and H2H (characteristics of both IoT and, therefore, also of IoMT), manipulate data exponentially, which will require sizeable digital storage locations.

One thing to keep in mind when it comes to IoMT is the security aspect. For this reason, due to the intrinsic capacity of IoT (technology based on IoMT), an encryption mechanism is provided (being able to apply cryptography models to the data) with established protocols so that data transmission is in the most integrated way. And safe as possible.

It is highlighted that the communication of the IoMT is wireless, as described in previous paragraphs. However, going into technical terms and concepts, IoMT bases its connections on protocols such as Near Field Communication (NFC) and Radio Frequency Identification (RFID). These technologies enable devices to share data and, therefore, to have exponential information about their surroundings. Of course, the transmission speed will be affected by the speed of the internet that is being accessed and other factors.

Among the advantages of IoMT, the ability to obtain different data and information relevant to health in real-time, either from an individual patient or from pooled results, stands out.

Emphasizing the optimization and agility of work by health employees or registered institutions should be clear that this, being an infrastructure, will benefit the population and the different devices connected. This represents one of the IoT's intrinsic capabilities; better connectivity and data transfer are obtained. Another advantage that stands out is the ability to provide a more efficient and optimal health system for remote patients.

This technology, by having the appropriate and essential wireless capacity for this type of challenge, makes a paradigm capable of improving the quality of life of a patient without the need to be physically inside a medical institution.

Another advantage is the reduction of expenses for medical bills. It is a balance point since deductions cannot be eliminated, but a nominal cost is evaluated in the long term. This advantage does not fall only on the patient (or their family); it is also addressed to the medical institution in charge of looking after the user. In addition, it clarifies the safety and confidence of the appropriate medication for the patient, which must be in the hands of the patient or of those responsible for their health, such as their family.

A patient-team relationship is established that constantly monitors their health. In this way, the medical staff (doctors, nurses, and anesthesiologists, among others) obtain up-to-date information to carry out each case's tasks, minimizing the margin of error in the medical field.

This generates the possibility of creating the patient's files, more detailed about previous treatments or chronic diseases, as well as other known ones. In turn, it will provide a health architecture compatible with the information technology department that will group the connections and facilitate the transformation and dissemination of data between machines (M2M).

It should be noted that IoMT is one of the paradigms that can reap the most significant benefits in terms of mobile devices. Mobile technology, as its name suggests, is not static and, in many cases, is at the hand of a user, that is, in their pocket, wrist, or another part of the body. IoMT can even scan and receive data from these devices to have a technological environment that follows the patient or user step by step, which could even be described as a mobile technology environment.

According to Pilkington, by 2040, the health area will have an ecosystem surrounded by multiple technological and medical factors that will make the interaction of an IoMT infrastructure possible. The ecosystem will have clinical devices, medical images, and information technologies focused on the health area and the pharmaceutical industry or drugs. All this will highly benefit specialists in detecting chronic diseases, mobile consumers, and primary health providers. Sports and fitness devices and wellness and health apps will come. Therefore, we will have the IoMT ecosystem that will provide health benefits through constant monitoring, which will result in longevity in the lives of your patient's [11].

Methodology

The methodology used in this article is qualitative research-action type, through which techniques are applied, such as the review of documents related to the topics to be discussed and internal group discussions among the author members of the article, to discuss and contribute ideas about the records and information found. The selection of these techniques occurs mainly because they allow the reinforcement of the findings of the most relevant factors during the experience period. This methodology also has the particularity of contemplating an initial review of readings, but it can be complemented as the article progresses.

The review process was carried out in detail, where articles that did not provide helpful information were excluded, and only those sources that were significant for the report were used, all based on the authors' judgment. The information search was limited to Spanish and English language sources. Additionally, as part of the information selection criteria, the articles examined the relationship between quality, user experience, and customer satisfaction individually and collectively. Action research aims to understand and seek solutions to specific problems of an organization, in this case, the Costa Rican Social Security Fund and its EDUS system. This

methodology is intended to arrive at a proposed solution to the problem of data decentralization in the EDUS medical record. This type of methodology, according to the results found, can denote the impact that it can create not only in a country or Latin America but worldwide if we remember that by 2021, humanity has not recovered from the COVID-19 pandemic, which has become an endemic evil for the entire world health system.

Results and discussion

If we can bring all the medical data together and make it securely accessible to the right staff, that could increase the quality and coordination of care. Also, patients will have more control and access to their information through verifiable consent. These are solid reasons that Blockchain technology is of great help in the health sector [12].

Patient data can be shared on a Blockchain in real time between groups of people and organizations authorized to read and manipulate it. Each event or process will have its history, becoming part of a permanent record within the chain that will remain unchanged when executed. In this chain, confidentiality can be guaranteed by agreeing on which transactions can be seen by the parties and by hiding the identity of that party if necessary. This way, Blockchains will move systems where a single owner keeps information, including medical records, prescription records, diagnostic tests, and more [12].

There are already consolidated solutions using Blockchain in the health sector; an example is MedChain. This solution brings the storage and distribution of medical information, allowing patients to control it. This platform has various functionalities, such as allowing the exchange of medical records while protecting the confidentiality of your data. The user can make medical consultations and diagnoses through the web and mobile applications. It allows managing the identity of users through smart cards—cryptographic databases index medical records.

MedChain is built on a decentralized network, connecting all healthcare providers, including hospitals, medical centers, clinics, and healthcare companies. The MedChain network contains two types of peer nodes: super peers and edge peers. A simple but reasonable pair selection approach is adopted. Super peers consist of servers from large healthcare providers, such as national hospitals, that are more capable of computing and storage, providing the primary infrastructure for sharing data. Edge nodes are the servers of small providers, such as community clinics, that only store actual patient data [13].

Even its payment method implements Blockchain technology, in which when paying for a data purchase service, the amount received is converted into a token and transferred to a smart contract. Accounts of patients whose data has been purchased will receive a portion of the tickets distributed proportionately among the patients, clinics, or other providers who have added the information to the database system. The platform gets the rest of the tokens, which are sent by smart contract to the address of the service provider [14].

As such, we see Blockchain solutions transforming the healthcare and financial ecosystem and increasing the quality of care by enabling innovative business models and development. The stored health information will change how you store clinical data and share it within your health centers, private institutions, and others. These aspects have made Blockchain technology so welcome in rapidly growing healthcare organizations.

Conclusions

By analyzing the case study and all the benefits that Blockchain technology can bring to an economy, a health innovation model could be created as an extensive registry with this technology that can even help predict medical services, demands in the supply chain for

suppliers, consumption habits, pension system, insurance system and this could be connected to the technology of this massive decentralized ledger, if this is administered by the state, as a health coverage policy in 100% of the citizens, it could be a success story, since the system and the budgeted approach would work for efficiency in the use of medicines, in the time of patient services, in M2M, H2M, and H2H interactions.

The strategic policy of citizen health would seek an efficiency never observed in health care and the optimization of equipment, devices, and mechanisms. Intelligent systems and the correct adaptation of technological innovation, accompanied by the reduction of the digital divide, could make prevention and predictions for citizens who are not vaccinated against COVID-19 and exposed to a disease or chronic conditions, for example, in the system. State computer, citizens with chronic health problems or who have not received full-dose vaccination cannot attend events with crowds or circumstances that may endanger their health or that of other citizens.

By implementing Blockchain in the health sector, it will be possible to maintain control of patient data. The medical history can be granted to private doctors or consultants where patients consent to use their data. Something significant to note that is beneficial in using this technology is that these medical records cannot be modified or deleted since it provides data integrity and security to prevent medical fraud or falsification.

References

- [1] F. Buitrago-Restrepo and I. Duque-Márquez, "La economía naranja: una oportunidad infinita," *Banco Interamericano de Desarrollo*, 2013. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11537/33528>.
- [2] M. Allende-López, "Cómo desarrollar confianza en entornos complejos para generar valor de impacto social," *Banco Interamericano de Desarrollo*, 2018. [Online]. Available: <https://www.compostela21.com/videojs/elementos/noticias/bitcoin/Blockchain.pdf>.
- [3] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández-Collado, and P. Baptista-Lucio, "Definición conceptual o constitutiva," *México: McGraw-Hill*, pp. 119-125, 2017.
- [4] J. Howkins, *The creative economy: How people make money from ideas*. Penguin UK, 2002.
- [5] R. Mendoza and P. Quiroz, "Tecnologías de la información y las comunicaciones más utilizadas por universitarios," vol. 4, ed. 3C TIC: 8, 2019.
- [6] C. Brulg, "International Confederation of Societies of Authors and Composers (CISAC) Sun and storm," *Copyright Bulletin*, vol. 32, pp. 4-6, 1998.
- [7] O. Economics and B. Council, "The economic impact of the creative industries in the Americas," 2014. [Online]. Available: <https://policycommons.net/artifacts/307843/the-economic-impact-of-the-creative-industries-in-the-americas/1226671/>.
- [8] BCCR, "Sistema de Cuentas Nacionales de Costa Rica en el marco del Cambio de Año Base 2012," Banco Central de Costa Rica, <https://activos.bccr.fi.cr/sitios/bccr/proyectocambioannyobase/DocProyectoCambioAnnoBase/documentoscnadocpresentaciones/Metodologia-CAB-2012.pdf>, 2020.
- [9] J. M. Benavente and M. Grazzi, "Políticas públicas para la creatividad y la innovación: impulsando la economía naranja en América Latina y el Caribe," *Washington DC: Banco Interamericano de desarrollo-BID*, 2017.
- [10] MCJ. "Banca para el Desarrollo y el MCJ establecen alianza para apoyar y fomentar emprendimientos artísticos y culturales " Ministerio de Cultura y Juventud. (accessed 2023).
- [11] MCJ. "Presentación de Resultados: Cuenta Satélite de Cultura, Cuenta Satélite de Cultura." Ministerio de Cultura y Juventud. <https://si.cultura.cr/cuenta-satelite-cultura> (accessed 2023).
- [12] A. Dovale and J. Morales, "Blockchain y el sector salud," *I+ S: Revista de la Sociedad Española de Informática y Salud*, no. 128, pp. 11-14, 2018.
- [13] B. Shen, J. Guo, and Y. Yang, "MedChain: Efficient healthcare data sharing via blockchain," *Applied sciences*, vol. 9, no. 6, p. 1207, 2019.
- [14] W. A. Espíritu-Aranda and C. F. Machuca-Nieva, "Modelo de Referencia para la Gestión de la Seguridad de Datos de Salud Soportado en una Plataforma Blockchain," 2021. [Online]. Available: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655799>.

Desarrollo y validación de un método para la determinación de nitrito en productos cárnicos mediante cromatografía iónica

Development and validation of a method for the determination of nitrite in meat products by ion chromatography

Priscilla Rojas-Alvarado¹, Laura Vindas-Angulo²

Fecha de recepción: 17 de mayo, 2022
Fecha de aprobación: 29 de agosto, 2022

Rojas-Alvarado, O; Vindas-Angulo, L. Desarrollo y validación de un método para la determinación de nitrito en productos cárnicos mediante cromatografía iónica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 87-98.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6136>

1 Docente. Costa Rica. Correo electrónico: pri0208@hotmail.com

2 Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: laura.vindasangulo@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-1399-9293>

Palabras clave

Nitrito, salchichón criollo, validación, cromatografía iónica.

Resumen

El nitrito de sodio se ha usado como preservante en los embutidos desde el siglo XIX debido a sus excelentes efectos inhibidores contra los microorganismos patógenos. Sin embargo, de acuerdo con diversos estudios, se encontró que cantidades elevadas de nitrito de sodio (mayores a 125 ppm) puede ser peligroso para los consumidores, debido a que se podrían formar nitrosaminas (carcinógenos). Por este motivo, el análisis para la determinación del contenido de nitrito de sodio en embutidos es sumamente importante. El objetivo principal de esta investigación fue el desarrollo y validación de un método para la determinación de nitritos en salchichón criollo que se comercializa en carnicerías en la región de Occidente, mediante una metodología por cromatografía de iones. La validación del método para la determinación de nitrito en salchichón criollo mediante cromatografía de iones presentó parámetros de desempeño aceptables. En cuanto a la linealidad se obtuvieron tres curvas de calibración con $R^2 \geq 0,995$. El análisis de residuales y la prueba de homocedasticidad mostraron que el método tiene una buena linealidad. La precisión del método también fue aceptable (CV: 1,68 % para la repetibilidad y un CV: 1,01 % para la reproducibilidad). Con respecto a la veracidad, se obtuvo un sesgo relativo de 4,31 %. En relación con la selectividad, se confirmó la identidad del analito y se obtuvo un límite de detección de 0,0003 ppm y un límite de cuantificación de 0,001 ppm. En relación con el estudio comparativo entre el método desarrollado y el método oficial, se evidencia que no hay diferencia significativa entre ambos. En conclusión, el método desarrollado aporta resultados igual de fidedignos que el método oficial.

Keywords

Nitrite, creole sausage, validation, ion chromatography.

Abstract

Sodium nitrite has been used as a preservative in sausages since the 19th century due to its excellent inhibitory effects against pathogenic microorganisms. However, according to several studies, it was found that high amounts of sodium nitrite (greater than 125 ppm) can be dangerous for consumers, because nitrosamines (carcinogens) could be formed. For this reason, the analysis for the determination of the content of sodium nitrite in sausages is extremely important. The main objective of this research was the development and validation of a method for the determination of nitrites in sausage that are sold in butcher shops in the Western region, using an ion chromatography methodology. The validation of the method for the determination of nitrite in Creole sausage by ion chromatography presented acceptable performance parameters. Regarding linearity, three calibration curves with $R^2 \geq 0.995$ will be acquired. Residual analysis and homoscedasticity test showed that the method has good linearity. The precision of the method was also acceptable (CV: 1.68% for repeatability and a CV: 1.01% for reproducibility). Regarding truthfulness, a relative bias of 4.31% was obtained. Regarding selectivity, the identity of the analyte was established and a detection limit of 0.0003 ppm and a quantification limit of 0.001 ppm were obtained. In relation to the comparative study between the developed method and the official method, it is evident that there is no significant difference between the two. In conclusion, the developed method provides the same reliable results as the official method.

Introducción

Los nitritos se han utilizado como aditivos para la preservación de productos cárnicos desde el siglo XIX. Su uso inició cuando se observó que sales como el nitrato de potasio (KNO_3), el nitrato de sodio (NaNO_3) y el nitrito de sodio (NaNO_2) presentaban mejores efectos preservantes que la sal común (NaCl) [1]. Los nitritos tienen efectos inhibidores contra microorganismos patógenos, estabilizan el color rojo de los pigmentos naturales de la carne, retrasan la rancidez, contribuyen con el desarrollo del sabor e inhiben la descomposición anaeróbica y la proliferación de microorganismos patógenos [2], [3].

A pesar de los beneficios que tienen los nitritos como preservantes, se ha presentado una gran discusión con respecto a su uso, debido a que se demostró que el uso de este aditivo forma compuestos de alta peligrosidad para la salud de las personas, como la formación de nitrosaminas y la incidencia de metahemoglobinemia [3], [4]. Esto llevó a regular la adición de nitrito de sodio usado como preservante, en distintos países. Generalmente, la cantidad permitida de nitritos se encuentra en el rango de concentraciones de 120-150 mg/kg [5].

En la actualidad, según el Código de Reglamentos Federales de Estados Unidos de América [6], el contenido de nitrito de sodio en embutidos no debe exceder de 200 mg/kg [6]. En Costa Rica se permite una concentración máxima de 125 mg/kg [7].

Debido al impacto en la salud que ha tenido la adición de nitritos en los embutidos, es necesario determinar su contenido en estos alimentos, por lo que se han desarrollado una gran variedad de técnicas analíticas. El método oficial para la cuantificación de nitritos en embutidos es el de la AOAC 973.31 [8]; utiliza espectroscopía ultravioleta visible, donde la adición de los reactivos generadores de color implica un mayor tiempo de procesamiento de las muestras; además el impacto en la salud ocupacional en el analista [2]., mientras que por cromatografía iónica se evita este paso y se tiene mejor sensibilidad al ser un método cromatográfico. Con base en lo expuesto, el objetivo de esta investigación fue desarrollar y validar un método para la determinación de nitritos en dos productos cárnicos, salchichón y chicharrón de carne, mediante cromatografía iónica.

Materiales y métodos

Reactivos y equipos utilizados

Se utilizó nitrito de sodio grado analítico (99,99%) marca Sigma Aldrich como estándar. Para la fase móvil se utilizaron bicarbonato de sodio (99,50%) y carbonato de sodio (99,50%) marca Sigma Aldrich y el flujo de esta fue de 1 ml/min. El cromatógrafo de iones utilizado fue el Dionex ICS 5000 marca Thermo Fisher, donde se utilizó una columna Dionex IonPac™ AS23 RFIC™ 4 X 250 mm, el volumen de inyección fue de 1 μL , el supresor utilizado fue ASRS™ 300 de 4 mm P/N 064554 y se utilizó un detector de conductividad.

Recolección y manejo de muestras

Se analizaron muestras de salchichón criollo; al ser elaborado de manera criolla este puede ser de carne vacuna o de mezclas de carne de cerdo, pollo y carne vacuna; en general no indicaban el tipo de carne en las etiquetas, las muestras fueron adquiridas en carnicerías en las que se elaboran o comercializan estos productos en la zona de Occidente en Costa Rica. Las muestras se guardaron en refrigeración, protegidas de la luz para evitar su descomposición.

Tratamiento de las muestras

Se tomó como referencia la preparación de la muestra según indica el método de la AOAC 973.31 [8], con modificaciones. La primera, se pesaron 50.00 g de muestra en balanza analítica, la segunda modificación constó en que después de aforar el balón se centrifugó durante 20 minutos y se filtra para la toma de alícuota con pipeta aforada de 20,00 mL. Por último, se omite la adición de los reactivos sulfanilamida y el reactivo de NED, para evitar la aparición de color.

Determinación de nitrito mediante la técnica de Cromatografía iónica

Se utilizó como referencia el procedimiento de las autoras López, Viera y Urbano [9], este método consiste en el desarrollo de un método para el análisis de nitrito, nitrato y cloruro de sodio en carnes frescas curadas de pollo, res y cerdo por medio de la técnica de cromatografía de iones, mientras que en el presente estudio se determinó nitrito de sodio en salchichón criollo y chicharrón de carne.

Para la preparación de la curva de calibración se tomó como referencia la preparación de las disoluciones estándar indicadas en el método oficial [8]. Se preparó una disolución madre de nitrito de sodio de concentración 500 ppm, luego una disolución de trabajo (50 ppm), y con ésta se prepararon siete soluciones estándar en un rango de concentraciones de 1,00 ppm - 7,00 ppm.

Validación de la metodología para la determinación de nitrito

La validación del método se llevó a cabo según los lineamientos establecidos en las guías del Ente Costarricense de Acreditación (ECA): ECA-MC-PO01 y ECA-MC-PO01-G01 [10]. Debido a que se trata de un método no normalizado, se evaluaron los siguientes parámetros de desempeño:

Ámbito de trabajo

Se midió el área en función de la concentración de analito para dos curvas de calibración, de siete patrones cada curva. La primera curva se realizó con bajas concentraciones (4,00 – 9,00 ppm) y la segunda con altas concentraciones (13,00 – 18,00 ppm). Los R^2 se determinaron en Excel.

Linealidad

Se obtuvieron tres curvas de calibración independientes para medir la linealidad del método, con tres repeticiones en cada punto y el siguiente análisis de los datos por Excel: regresión en las curvas de calibración, de los residuales y una prueba de homocedasticidad con el test de Cochran.

Precisión

Para esta se evaluó la repetibilidad y la precisión intermedia.

- Repetibilidad: se seleccionaron dos patrones de la curva de calibración correspondiente a 3,00 ppm y 5,00 ppm. Se prepararon 10 repeticiones de cada patrón y se determinó la desviación estándar (DS) por Excel.
- Precisión intermedia: se seleccionaron dos patrones de la curva de calibración correspondiente a 3,00 ppm y 5,00 ppm. Se prepararon 10 repeticiones de cada patrón, una cada día diferente y se determinó la DS por Excel.

Ambos parámetros se llevaron a cabo bajo condiciones de T 25°C y H% 70%, en el laboratorio de química del Recinto de Grecia de la Universidad de Costa Rica.

Límite de detección

Se hicieron 10 medidas replicadas de blancos fortificados a concentraciones de 0,3 ppm; 0,5 ppm y 0,9 ppm. Se calculó la DS y el límite de detección (LOD) por Excel. De acuerdo con criterio de la guía Eurachem donde indica: Para $LMP \geq 0,1$ ppm un $LD \leq 1/10$ LMP [11].

Límite de cuantificación

Se hicieron 10 medidas replicadas de blancos fortificados a concentraciones de 0,3 ppm; 0,5 ppm y 0,9 ppm. Se calculó la DS y el límite de cuantificación (LOQ) por Excel. De acuerdo con criterio de la guía Eurachem donde indica: Para $LMP \geq 0,1$ ppm un $LQ \leq 1/5$ LMP [11].

Veracidad

Se midió el material de referencia (MR) el estándar de nitrito de sodio utilizando el método propuesto [11]. Se comparó el valor promedio obtenido, con el valor de referencia x_{ref} para el MR. Se calculó el sesgo, el sesgo relativo en porcentaje, y la recuperación relativa en porcentaje

Selectividad

En el cromatograma se verificó que la señal observada correspondía al ion nitrito. Se analizaron diez muestras de ensayo por el método propuesto y el método oficial. Con los resultados, se hizo un análisis de varianza de un factor (ANOVA), pruebas F y pruebas T por Minitab 2019, para determinar si el método propuesto brindaba resultados igual de fidedignos que el método oficial.

Robustez

Se llevó a cabo el *test* de robustez de Youden y Steiner. En esta prueba, se estudiaron seis variables: temperatura de digestión, tiempo de digestión, flujo de fase móvil, tiempo de centrifugado, degradación de la muestra y temperatura del detector.

Incertidumbre

Se analizaron los componentes relacionados en el análisis, por ejemplo, la medición de masa, el uso de balones y pipetas. Se calculó la incertidumbre de todos los componentes relacionados con el análisis.

Comparación de los métodos para la determinación de nitrito de sodio

Para la comparación de resultados entre el método oficial y el de cromatografía de iones, se llevó a cabo el análisis de diez réplicas de una misma muestra, mediante las dos metodologías mencionadas. Con los resultados obtenidos, se hicieron diferentes pruebas estadísticas de significancia, se hizo uso de pruebas estadísticas para el análisis de errores sistemáticos como prueba F, comparación de dos medias experimentales y el análisis de varianza (ANOVA). Las pruebas se hicieron con ayuda de programas estadísticos como MINITAB 18 y Microsoft Excel Plus 2016.

Resultados y Discusión

Validación del método

Cuando se desarrolla un nuevo método para la determinación de un analito, este debe validarse para comprobar la calidad de los datos [10], [12] y [13]. El alcance de la validación depende del tipo de método por validar, en este caso se cuenta con un método no normalizado (situación 3). Por lo tanto, se validaron los siguientes parámetros de desempeño: ámbito de trabajo, linealidad, precisión, veracidad, selectividad, límite de detección, límite de cuantificación, incertidumbre y robustez [10].

El ámbito de trabajo se determinó a partir de siete patrones de nitrito con concentraciones entre 1,00 ppm – 7,00 ppm, presentando un comportamiento lineal adecuado con $R^2 \geq 0,995$ y mayor sensibilidad. Seguidamente, se evaluó el parámetro de desempeño de la linealidad. En la Figura 1a se observan las curvas de calibración obtenidas por triplicado; donde cada patrón se preparó por triplicado. Para el sistema en el rango de concentraciones establecido y se muestran las ecuaciones de las rectas obtenidas; las cuales no presentan grandes diferencias entre sí, con un coeficiente de correlación adecuado ($R^2 \geq 0,995$).

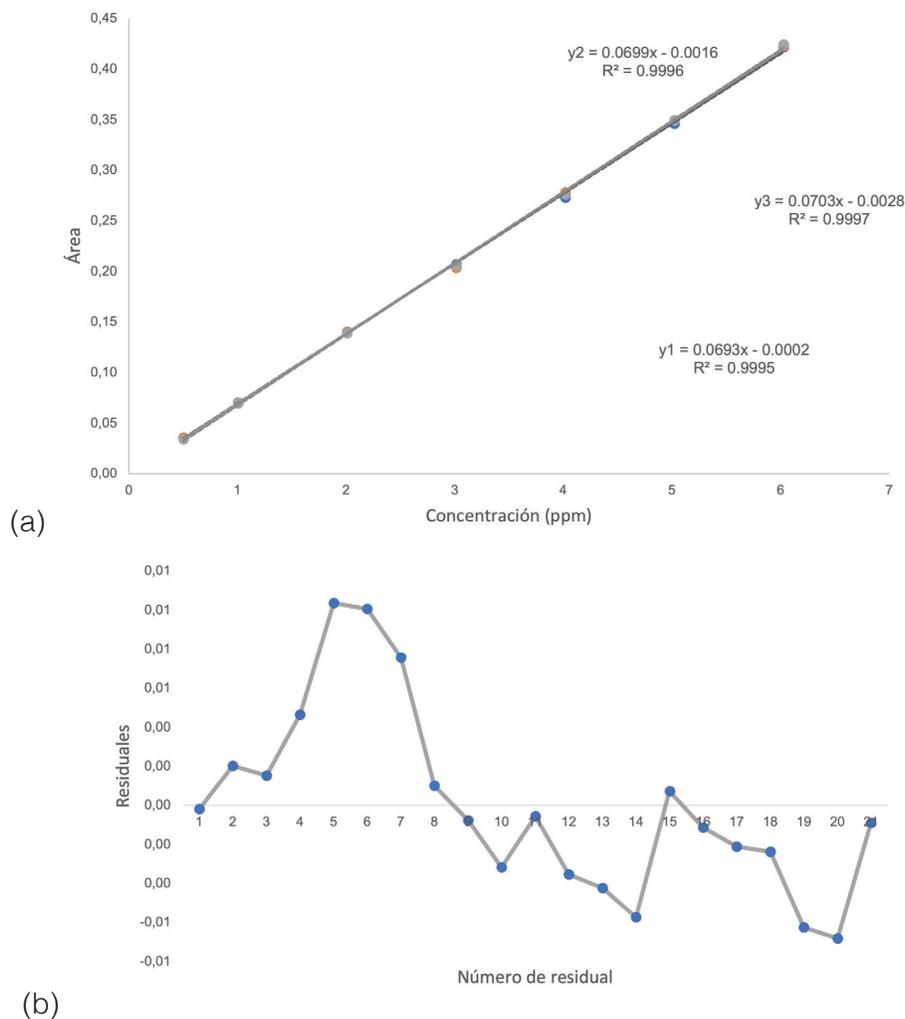


Figura 1. Parámetro de desempeño de linealidad (a), Superposición de curvas de calibración para comprobar linealidad del sistema (b). Análisis de residuales de las curvas de calibración.

Se realizó un análisis de los residuos correspondientes a la validación de la linealidad del sistema (Figura 1b). El comportamiento aleatorio de los datos indica que existe linealidad [14]. Además, se evaluó la homocedasticidad, para comprobar la linealidad del método. La estimación se llevó a cabo mediante el *test* de Cochran, por medio de la ecuación 1, donde s_{\max}^2 y s_i^2 representan la varianza máxima y la varianza obtenida de cada patrón.

$$C = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2} \quad (1)$$

Al calcular el valor C, este se compara con los valores críticos establecidos para la prueba de Cochran. Para la homocedasticidad del sistema, se obtuvo un valor C de 0,35; menor que el valor crítico 0,8534. Esto demuestra que las varianzas son iguales [15] y [16]. en las tres curvas preparadas; es decir, que existe un comportamiento homocedástico.

En relación con el parámetro de desempeño de la precisión, se determinó la repetibilidad y la precisión intermedia del método. Como se observa en la Cuadro 1, el coeficiente de variación (CV) obtenido en ambos parámetros cumple con el criterio de aceptación, por lo tanto, se evidencia que el método cuenta con una precisión óptima. En cuanto a la veracidad (Cuadro 1), se observa que el valor obtenido para el sesgo relativo fue de 4,31 %; cumple con el criterio de aceptación e indica que este brinda resultados exactos y confiables.

Cuadro 1. Parámetros de desempeño del método de análisis de nitrito en salchichón criollo y chicharrón de carne por cromatografía de iones.

Parámetro de desempeño	Resultado	Criterio de aceptación
Ámbito de trabajo	1,0– 7,00 ppm R^2 : 0,9998	$R^2 \geq 0,995$
Linealidad	$R^2_{C1} = 0,9998$ $R^2_{C2} = 0,9999$ $R^2_{C3} = 0,9998$	$R^2 \geq 0,995$
Repetibilidad Desviación estándar Coeficiente de variación	0,05 CV: 1,68%	$CV \leq 3$
Reproducibilidad Desviación estándar Coeficiente de variación	0,05 CV: 1,01%	$CV \leq 6$
Veracidad Sesgo relativo % de recuperación	4,31 % 104,31%	Sesgo relativo < 10%
Selectividad	Se confirma que el pico es de nitrito.	Confirmación de la identidad del analito.
Límite de detección	0,0003 ppm	Para LMP $\geq 0,1$ ppm un LD $\leq 1/10$ LMP.
Límite de cuantificación	0,001 ppm	Para LMP $\geq 0,1$ ppm un LQ $\leq 1/5$ LMP.
Incertidumbre	0,5 ppm ⁽¹⁾	

(1): Incertidumbre máxima obtenida.

En cuanto al parámetro de desempeño de selectividad, se verificó que el pico obtenido en el cromatograma correspondiera al ion nitrito, de acuerdo con su tiempo de retención. Además, se realizaron otras pruebas estadísticas para evaluar la selectividad, detalladas en la sección *Comparación de métodos*.

En el Cuadro 1 se muestran los valores para los límites de detección y cuantificación. El valor del límite de detección representa el nivel de señal en el que se puede encontrar el analito sin confundirlo con el ruido instrumental. El límite de cuantificación indica el nivel al cual la precisión de la medida permite una determinación adecuada [13]. Se observa que ambos límites cumplen con los criterios de aceptación. La incertidumbre de medición se determinó considerando todos los componentes relacionados en el análisis, la incertidumbre dio un valor de 0,5 ppm (Cuadro 1).

Finalmente, se evaluaron seis variables críticas del método en desarrollo, para verificar si el método es robusto: temperatura de digestión, tiempo de digestión, flujo de la fase móvil, tiempo del centrifugado, tiempo de degradación de la muestra y temperatura del detector. En el Cuadro 2, se listan los factores que podrían afectar el método. Como se muestra, los factores críticos son la temperatura de digestión y el tiempo de digestión, pues se relacionan directamente con la extracción de nitrito de la muestra. Si se modifican estas variables, el método no sería adecuado para la cuantificación del analito.

El flujo de la fase móvil y el tiempo de degradación de la muestra no se incluyeron en el Cuadro 2, debido a que, al modificar estos factores, no se pudo medir adecuadamente el analito. Al cambiar el flujo de la fase móvil, el ion cloruro opaca al ion nitrito y no se logró observar adecuadamente el pico cromatográfico del nitrito. Con respecto al tiempo de degradación de la muestra, la degradación del ion nitrito no permitió el registro de su pico cromatográfico.

El tiempo de centrifugado y la temperatura del detector no afectaron al método de análisis (Cuadro 2). Sin embargo, de acuerdo con los factores analizados, se indica que el método no es robusto, debido a que el método es susceptible a cambios como la temperatura de digestión y el tiempo de digestión.

Cuadro 2. Resultados de la prueba de robustez del método cromatográfico.

Factor	Valor de la condición de la variable	Análisis								Resultado		Diferencia	Criterio $\Delta \geq \sqrt{2} S$
		1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio x	Promedio y		
Temperatura digestión	A 100°C, a 80°C	A	A	A	A	a	a	a	a	66,72	53,24	13,48	Afecta
Tiempo digestión	B 2 h, b 1 h	B	B	B	B	b	b	b	b	30,92	23,91	7,01	Afecta
Tiempo de centrifugado	D 30 min, d 10 min	D	D	D	D	d	d	d	d	33,15	35,41	-2,26	No afecta
Temperatura del detector	F 35°C, f 20°C	F	F	F	F	f	f	f	f	61,06	66,20	-5,14	No afecta
Factor	Resultado de mediciones	s	t	u	v	w	x	y	z				
Criterio	$\Delta \geq \sqrt{2} S$ $\Delta \geq 0,071$ Si la diferencia es mayor o igual a $\sqrt{2} S$, el factor afecta el método.												

Comparación de métodos

Cuando se desarrolla un método nuevo para la determinación de un analito; en este caso de nitrito, el método debe validarse [10] y [12]. Mediante diferentes parámetros de desempeño como los descritos anteriormente. Uno de los más determinantes es comparar los resultados obtenidos por el método desarrollado con los adquiridos mediante el método oficial. Para identificar errores sistemáticos, es decir, evaluar si el método por desarrollar proporciona resultados significativamente más altos o bajos que el procedimiento oficial [12]. Los resultados arrojados para ambos métodos se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Resultados de las concentraciones obtenidas por el método desarrollado y el método oficial.

Resultados de las muestras de salchichón por los métodos: Cromatografía de Iones y el Espectrofotométrico UV-Vis			
Muestra	Masa (g)	Concentración obtenida (ppm) por método CI	Concentración obtenida (ppm) por método UV-Vis
1	50.0011	38.4526	42.7496
2	50.0003	37.9290	47.5322
3	50.0013	38.1641	42.7495
4	50.0000	38.3748	41.7942
5	50.0009	38.0596	41.7934
6	50.0009	38.0858	45.6189
7	50.0026	37.5079	36.0540
8	50.0014	37.6136	35.0985
9	50.0015	36.5389	32.2293
10	50.0005	37.1949	30.3172

Con los resultados mostrados en el Cuadro 3, se llevó a cabo el contraste F para la comparación de las desviaciones estándar de los dos conjuntos de datos obtenidos por de cromatografía de iones (CI) y mediante el método oficial de la AOAC 973.31, por espectroscopia ultravioleta visible (UV). Se realizó el contraste de dos colas para establecer si las desviaciones estándar difieren en su precisión [12]. La hipótesis nula (H_0) establece que los dos métodos tienen varianzas iguales ($H_0: \theta_1 = \theta_2$). Como se observa en el Cuadro 4 el valor crítico de F para dos colas es mayor que el F obtenido, H_0 no se rechaza, asumiéndose que las varianzas son iguales.

Para la comparación de medias experimentales, se tomó como hipótesis nula (H_0) que los dos métodos proporcionan el mismo resultado suponiendo que las varianzas son iguales ($H_0: \mu_1 = \mu_2$). Es decir, se prueba si existen diferencias significativas entre los promedios obtenidos por ambos métodos [17].

Como se observa en el Cuadro 4 el valor crítico de t para dos colas es mayor que el t obtenido. Además, en el Cuadro 4 puede verse que el valor p obtenido es mayor que el nivel de significancia ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, la hipótesis nula H_0 no se rechaza [12] y [17], pues no existe diferencia significativa entre los resultados proporcionados por ambos métodos, indicando que el método desarrollado en este estudio proporciona resultados igual de fidedignos que el método oficial.

Cuadro 4. Pruebas estadísticas para la comparación de los métodos analíticos en muestras de salchichón criollo.

Prueba estadística	Valor calculado	Valor crítico
Prueba F ⁽¹⁾	0.010	4.026
Prueba t ⁽²⁾	0.34079	2.10

Prueba F para varianzas de dos muestras de salchichón criollo. Prueba t para dos muestras de salchichón criollo suponiendo varianzas iguales

Finalmente, se hizo un análisis de varianza de un factor (ANOVA) para contrastar si el contenido de nitrito en la muestra de salchichón criollo presenta diferencias significativas al analizarse mediante CI y mediante UV. En el Cuadro 5 se observa que el valor p obtenido en el ANOVA, es mayor que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$). Es decir, que las medias obtenidas por ambos métodos de análisis no presentan diferencias significativas.

Cuadro 5. Análisis de varianza de un factor para la comparación de muestras de salchichón criollo.

Fuente	GL ⁽¹⁾	SC Sec ⁽²⁾	SC Aj. ⁽³⁾	MC Aj. ⁽⁴⁾	Valor F	Valor p
Métodos	1	16,23	16,23	16,23	0,96	0,341
Error	18	305,08	305,08	16,95		
Total	19	321,31				

(1): Grados de libertad. (2): Suma de cuadrados. (3): Suma de cuadrados ajustado. (4): Media de cuadrados ajustado.

En relación con los residuos para ANOVA de un solo factor, se elaboraron cuatro gráficas para observar su comportamiento. En la Figura 2a se muestra el gráfico de probabilidad normal, que permite verificar el supuesto de que los residuos están distribuidos de forma normal [17] y [18]. En este caso los residuos se mantienen describiendo una línea recta y no se muestran patrones de distribución que indiquen que no están distribuidos normalmente, por lo tanto, no hay evidencia de no normalidad.

En cuanto a la gráfica de residuo vs. ajustes (Figura 2b), se observa que los puntos se ubican, de manera aleatoria, a ambos lados del cero y no se encuentran patrones detectables en los puntos. Es decir, que los residuos se distribuyen aleatoriamente y tienen una varianza constante [17]. Para la gráfica de residuos vs. orden (Figura 2d), empleada para verificar el supuesto de que los residuos son independientes entre sí, al ubicarse de manera aleatoria alrededor de la línea central, sin seguir tendencias ni patrones cuando se muestran en orden cronológico [17] y [18]. Se observa que los residuos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea central y no hay evidencia de que no sean independientes.

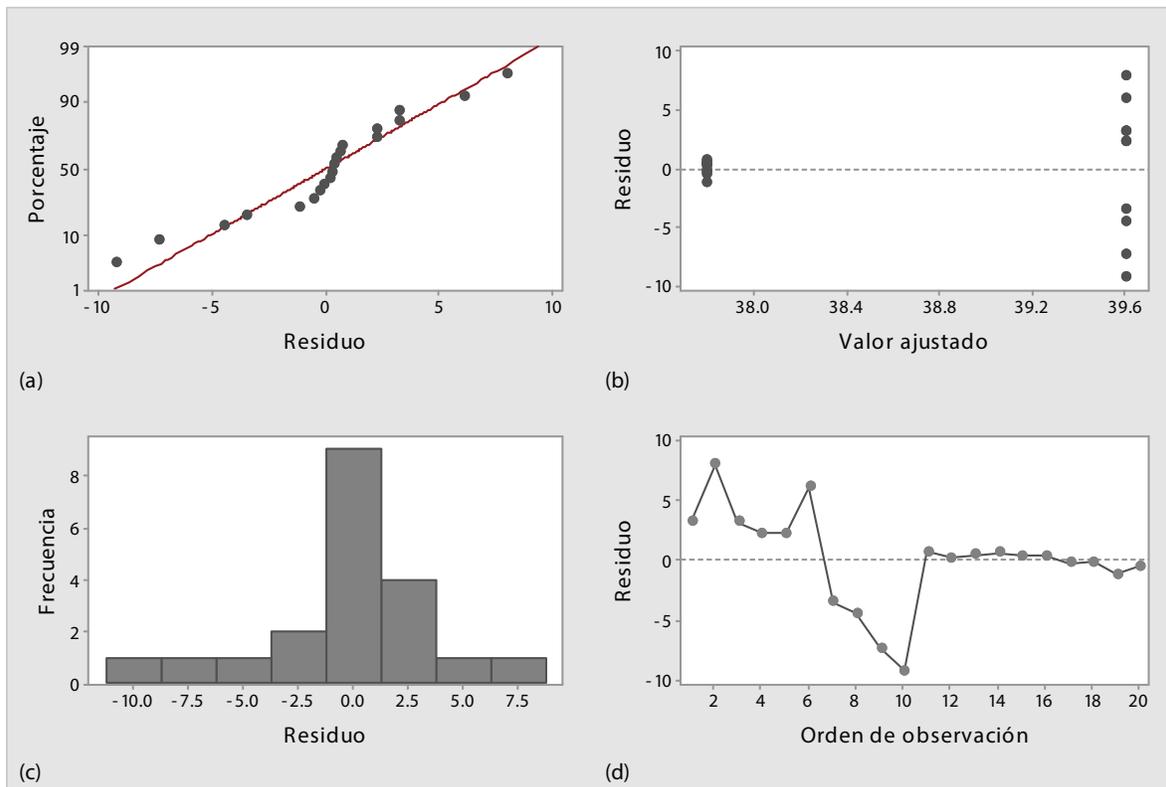


Figura 2. Gráficas de residuos para ANOVA de un solo factor en muestras de salchichón criollo. (a) Gráfica de probabilidad normal. (b) vs. Ajustes. (c) Histograma. (d) vs. Orden. Fuente: elaboración propia mediante Minitab 2019.

Conclusiones

En cuanto al ámbito lineal se determinó que el método presentó una mejor linealidad en el rango de concentraciones de 1,0 – 7,0 ppm, con valores de coeficientes de correlación $\geq 0,995$. El análisis de los residuos y la evaluación de la homocedasticidad, demuestran que el método presenta una linealidad adecuada. Con respecto a la precisión y la veracidad del método, el coeficiente de variación y el sesgo obtenido cumplen con el criterio de aceptación, es decir que el método aporta resultados precisos, exactos y fidedignos. El estudio estadístico comparativo entre el método desarrollado y el método oficial para determinar nitrito demuestra que no hay diferencia significativa entre ambos. Esto indica que el método desarrollado aporta resultados igual de fidedignos y confiables que el método oficial.

Agradecimientos

Las autoras agradecen al laboratorio de química del Recinto de Grecia, Universidad de Costa Rica, por permitir el desarrollo del proyecto código 540-B8-049 “Desarrollo de un método para el análisis de nitritos en dos productos cárnicos: el salchichón y el chicharrón de carne de consumo nacional en la región de Occidente mediante la técnica de cromatografía de iones”.

Referencias

- [1] K. Honikel. “The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products”. *Meat Science*, vol. 78, pp. 68–76, 2008.



- [2] J. Rodríguez, É. Vargas y M. Gómez. "Procesos Industriales: manual de laboratorio para el análisis químico y control de calidad". Heredia, Costa Rica: Editorial Universidad Nacional (EUNA). (2009)
- [3] C. Ruíz, A. Herrero y F. Jiménez. "Determination of Nitrates and Nitrites," en *Flow Injection Analysis of Food Additives*, 1st ed, New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2016, pp. 135-152.
- [4] M. Selbes. "The Effects Of Amine Structure, Chloramine Species and Oxidation Strategies On The Formation Of N-Nitrosodimethylamine" (Tesis Doctoral). Clemson University, Estados Unidos, 2014.
- [5] Handbook of Food Analysis Two Volume Set, 3rd ed., 2015, pp. 289-299.
- [6] U.S. Food & Drug. (FDA). Food and Drugs Chapter I-Food and Drug Administration Department of Health and Human Services (Title 21, Volume 21), 2016.
- [7] Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y el Ministerio de Salud. Decreto N.º 35079-MEIC-MAG-S. Productos cárnicos embutidos: salchicha, salchichón, mortadela y chorizo. Especificaciones, 2009.
- [8] Association of Official Agricultural Chemists (AOAC). Official methods of analysis of AOAC International, 2016.
- [9] C. López, I. Viera y A. Urbano. "Development and validation of an ionic chromatography method for the determination of nitrate, nitrite and chloride in meat". *Food Chemistry*, vol. (194), pp. 687-694, 2016.
- [10] Ente Costarricense de Acreditación (ECA). GUÍA PARA LA VALIDACIÓN DE MÉTODOS. Código N°: ECA-MCPO01-G01. Versión N° 3, 2014
- [11] Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos – Una Guía de laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados, 2016.
- [12] J. Miller y J. Miller. *Estadística para química analítica*. 4ta ed, Madrid: Pearson Educación. S. A, 2002.
- [13] S. Vargas y C. Herrera, C. "Contenido de Nitrito de Sodio y Bases Volátiles Nitrogenadas Totales en el Salchichón Producido por Empresas Embutidoras Nacionales", *Ingeniería y Ciencia Química*, vol. 20 (1), pp. 17-23, 2002.
- [14] E. Pérez y A. Rojas, "Validación de un método para cuantificación de acetaminofén en tabletas de 500mg por espectrofotometría ultravioleta para la prueba de uniformidad de contenido" en *Revista Intersedes*. vol. 17 (35), 2016.
- [15] P. Martel y J. Díez, J. *Probabilidad y estadística en medicina: aplicaciones en la práctica clínica y en la gestión sanitaria*. 1era ed, Madrid: Díaz de Santos, 1997.
- [16] C. Mongay. *Quimiometría*. 1era ed, Valencia: Universidad de Valencia, 2005.
- [17] Minitab. Minitab reference manual: Macintosh versión, release 8. State College, PA: Minitab, 2019.
- [18] L. Vindas, N, Rodríguez y Y. Araya. "Influencia de las características químicas y el tiempo de almacenamiento en el contenido de nitrito de sodio en salchichas elaboradas industrialmente". *RECYT*, vol. 21(31), pp. 36-41, 2019.

Adsorción y dosificación de Ca en suelos de Buenos Aires, Argentina

Adsorption and dosage of Ca in soils of Buenos Aires, Argentina

Daniel A. Ferro¹, Brian Andreini², Víctor Merani³, Luciano Larrieu⁴, Matilde Mur⁵, Facundo Guilino⁶, Esteban Pereira⁷, Tatiana Cinquetti⁸, Guillermo Millán⁹, José Augusto Imaz¹⁰

Fecha de recepción: 2 de noviembre, 2022
Fecha de aprobación: 21 de febrero, 2023

Ferro, D.A.; Andreini, B.; Merani, V.; Larrieu, L.; Mur, M.; Guilino, F.; Pereira, E.; Cinquetti, T.; Millán, G.; Imaz, J.A. Adsorción y dosificación de CA en suelos de Buenos Aires, Argentina. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 99-114.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6429>

- 1 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: daniel.ferro@agro.unlp.edu.ar
 <https://orcid.org/0000-0002-0039-6020>
- 2 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: brian_a594@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-0768-1921>
- 3 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: victormerani@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-0681-7535>
- 4 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: larrieu luciano@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9520-158X>
- 5 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: matilde_mur@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-6055-2638>
- 6 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: fguilino_33@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-2337-3833>
- 7 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: pereiraestebanivan@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-9847-7111>
- 8 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: tatianacinquetti@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5263-4684>
- 9 Universidad Nacional de La Plata. Argentina. Correo electrónico: gmillan@agro.unlp.edu.ar
 <https://orcid.org/0000-0001-6832-9863>
- 10 The University of Sydney. Australia. Correo electrónico: augusto.imaz@sydney.edu.au
 <https://orcid.org/0000-0001-8683-7140>

Palabras clave

Isotermas; nutrientes; bases.

Resumen

Las isotermas de adsorción se han utilizado para evaluar disponibilidad de nutrientes en suelo. Los suelos de la Región Pampeana se han considerado bien dotados de bases, aunque hay evidencias sobre su disminución causada por actividades agropecuarias sin reposición de nutrientes como calcio (Ca). El objetivo fue ajustar isotermas de adsorción y ecuaciones de dosificación de Ca en suelos agroproductivos de Buenos Aires. Se pesaron suelos de Bellocq, Inchausti y Belgrano y se agregaron soluciones con diferentes concentraciones de Ca. Se determinó la concentración en el equilibrio luego de su estabilización y se ajustaron los resultados según las isotermas de Langmuir, Freundlich, Van Huay y Temkin y ecuaciones de dosificación. La isoterma de Van Huay logró predecir con elevados grados de ajuste en los tres sitios ($R^2 > 0,98$) y solamente la ecuación de Freundlich se ajustó a Bellocq. Las ecuaciones de dosificación se ajustaron en todos los suelos, en un primer segmento con ecuaciones cuadráticas y en un segundo segmento con ecuaciones lineales. El suelo de Belgrano se diferenció de los restantes sitios en los parámetros de la ecuación de Van Huay, sugiriendo una mayor afinidad con los coloides y mayor reserva del nutriente en el corto plazo, asociado a su mayor contenido de CO, CIC y P. Los resultados encontrados pudieron ser comparado con estudios realizados en K y/o en suelos tropicales. Estos estudios sugieren la posibilidad de utilizar las isotermas de adsorción y ecuaciones de dosificación como herramientas para la toma de decisiones en fertilización en suelos de Buenos Aires.

Keywords

Isotherms; nutrients; bases.

Abstract

Adsorption isotherms have been used to evaluate nutrients in soil. The soils of the Argentinean Pampas have been considered well-endowed with bases, although there is evidence of their decrease caused by agricultural activities without replacement of nutrients such as calcium (Ca). The objective was to adjust adsorption isotherms and dosage equations of Ca in agroproductive soils of Buenos Aires. Bellocq, Inchausti and Belgrano soils were weighed and solutions with different Ca concentrations were added. The equilibrium concentration was determined after stabilization and the results were adjusted according to the Langmuir, Freundlich, Van Huay and Temkin isotherms and equations of dosage. The Van Huay isotherm was able to predict with high degrees of adjustment in the three sites ($R^2 > 0.98$) and only the Freundlich equation was adjusted to Bellocq. The dosage equations were adjusted in all the soils, in a first segment with quadratic equations and in a second segment with linear equations. The Belgrano soil differed from the other sites in the parameters of the Van Huay equation, suggesting a greater affinity with the colloids and a greater reserve of the nutrient in the short term, associated with its higher content of CO, CEC and possibly, P. The results found could be compared with studies carried out in K and/or in tropical soils. These studies suggest the possibility of using adsorption isotherms and dosage equations as tools for decision-making in fertilization in soils of Buenos Aires.

Introducción

Las isothermas de adsorción se definen como una relación que describe el fenómeno que rige la movilidad de una sustancia de un medio acuoso poroso, incluyendo retención y liberación, hacia una fase sólida a temperatura y pH constante [1]. La adsorción en suelo afecta la disponibilidad de nutrientes y, en consecuencia, se han utilizado como herramientas para evaluar la dinámica de micronutrientes y macronutrientes, como potasio (K) y fósforo (P), en sitios considerados deficientes [2], [3].

Las isothermas de Langmuir, Freundlich, Tempking y Van Huay son las más utilizadas, y son consideradas el método más preciso para evaluar las cantidades necesarias de nutriente a agregar para un crecimiento óptimo de cultivos [5]. El tipo de isoterma de ajuste, así como la magnitud de los parámetros que la componen, permiten conocer la dinámica de los nutrientes en sus diferentes formas edáficas y su relación con las propiedades del suelo, entre ellas mineralogía, tipo de arcillas, superficie específica y densidad de cargas de partículas, entre otras [4], [6]–[8]. Los principales procesos que pueden desprenderse del análisis de isothermas son la adsorción-desorción del nutriente, la precipitación y la generación de clústeres. Los procesos mencionados dependerán del nutriente que se estudie, de su concentración en suelo y de la interacción compleja que pueda surgir con otros nutrientes y los coloides, ocasionando que el ajuste con isothermas sea dificultoso [4], [9], [10]. Algunos autores mencionan que la isoterma de Freundlich posee la capacidad de explicar de una forma mejor el comportamiento de nutrientes en sitios experimentales por asumir ilimitados sitios de adsorción, quienes podrían deberse a la heterogeneidad de los coloides del suelo [10], [11].

El Ca en suelo se encuentra formando parte de minerales primarios (feldespatos, anfíboles), precipitado (carbonatos, fosfatos, sulfatos), en la materia orgánica y en la solución del suelo en forma de ión Ca^{2+} [12], [13]. La mayor parte del Ca soluble, a su vez, se encuentra adsorbido a las cargas negativas de los coloides formando parte de la solución interna o fracción intercambiable; mientras que parte soluble restante se encuentra en la solución externa, sin interacción con las cargas negativas de los coloides, y posible de ser absorbido por las plantas para suplir sus requerimientos [14]–[16]. La capacidad que tiene un suelo para reponer los iones absorbidos por las plantas hacia la solución externa se denomina poder amortiguador, y el proceso mediante se conoce como renovación. Esta característica se debe a que las concentraciones de los iones en la solución interna y externa se encuentran en un equilibrio dinámico. Este equilibrio se encuentra condicionado por características de los propios iones y de los coloides del suelo, permitiendo el desplazamiento de iones en ambos sentidos [17]–[19].

El equilibrio dinámico entre las concentraciones del Ca, y bases en general del suelo, es complejo y dependiente de las condiciones particulares de cada sitio [20]. Las características de los iones que intervienen en este proceso son, fundamentalmente, su concentración, su valencia y su radio hidratado [18], [21], mientras que las propiedades de los coloides que afectan el intercambio iónico son la cantidad de coloides, el tipo, la superficie específica y la densidad de cargas [21], [22]. Adicionalmente, existe un fenómeno denominado selectividad de adsorción que influye en el equilibrio, siendo originado por la interacción preferencial entre algunos tipos de coloides con ciertos iones debido a propiedades estéricas [23].

El estudio de isothermas de adsorción en Ca es muy escaso. Marcano-Martinez & McBride [24] han evaluado su adsorción en suelos oxisoles agrícolas en Brasil, que suelen ser deficientes en Ca por su condición de acidez y evidenciaron una relación ligeramente curvilínea que se ajustaba muy bien con la isoterma de Freundlich y ecuaciones cuadráticas, ensayando concentraciones hasta 3 mM Ca (6 meq l^{-1}) en solución de equilibrio ($R^2 > 0,99$), alcanzando saturaciones cálcicas máximas entre 66% y 95%. En la Región Pampeana no se han encontrado estudios realizados con estos modelos y puede deberse a que los suelos se han considerado

tradicionalmente bien dotados de Ca. Sin embargo, se han encontrado zonas deficientes debido a que los sistemas agropecuarios extraen Ca del sistema sin realizar reposiciones [25]. Más aún, algunos autores han encontrado respuesta en el rendimiento de cultivos de cosecha ante el aporte de este elemento como fertilizante y hallaron una estrecha relación entre el rendimiento de cultivos extensivos y el contenido de Ca en la fracción intercambiable de suelos agrícolas de la Región Pampeana [26], [27]. Pese a esto, los ensayos realizados no se ajustaron a calibraciones previas ya que no existen modelos ajustados para el diagnóstico y fertilización con Ca. Agravando la situación, la determinación de bases en laboratorios de suelos en general es reducida [28] poniendo de manifiesto la escasa preocupación respecto a la pérdida y dinámica general del Ca en estos suelos y, por lo tanto, evidencia la falta de conocimiento para su manejo en prácticas de fertilización.

El estudio del comportamiento del Ca en suelos agrícolas de Buenos Aires mediante ecuaciones de adsorción y dosificación permitirá conocer su dinámica ante su incorporación por fertilizantes y comprender su comportamiento en aquellos casos donde pueda resultar deficiente para el crecimiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue ajustar isotermas de adsorción y funciones de dosificación de Ca en suelos agroproductivos de la provincia de Buenos Aires.

Materiales y métodos

Se realizó un ensayo siguiendo el procedimiento de cantidad/intensidad basado en el método descrito por Beckett [29], modificado para Ca, en los suelos de Belgrano, Bellocq e Inchausti pertenecientes a la provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1). Los datos de los suelos utilizados se presentan en el Cuadro 1.

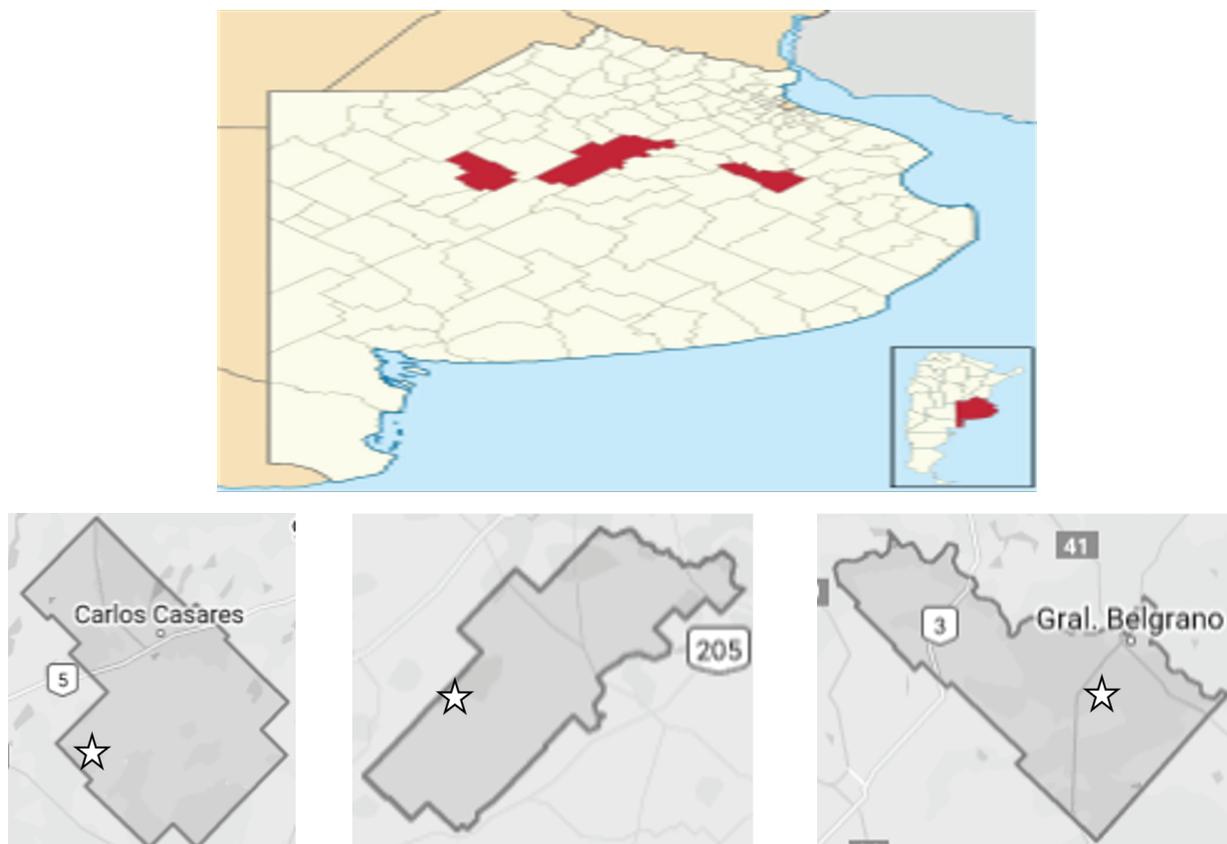


Figura 1. Ubicación de los partidos y sitios de ensayos comparativos en la provincia de Buenos Aires. Izquierda: Bellocq; Centro: Inchausti; Derecha: Belgrano [30].

Cuadro 1. Ubicación, taxonomía del suelo y análisis químicos iniciales de los suelos estudiados: pH, carbono oxidable (CO), fósforo extractable (Pbk), nitrógeno total (Nt), conductividad eléctrica en extracto de saturación (CE), Ca soluble en extracto de saturación (CaCE), Arena, Limo y Arcilla, capacidad de intercambio catiónica (CIC), calcio intercambiable (CaCIC), magnesio intercambiable (MgCIC), sodio intercambiable (NaCIC) expresado en cmolc kg^{-1} , potasio intercambiable (KCIC), sumatoria de bases intercambiables (S), saturación de bases en la CIC (S/CIC), saturación cálcica en relación a la sumatoria de bases (CaCIC/S) y saturación cálcica en relación a la capacidad de intercambio catiónica (CaCIC/CIC).

Lugar		Bellocq	Inchausti	Belgrano
Latitud		S 35°55'32,55"	S 35°36'49,55"	S 35°52'36,86"
Longitud		W 61°29'17,78"	W 60°32'23,46"	W 58°33'44,20"
Gran grupo		Hapludol éntico	Hapludol éntico	Argiudol abruptico
pH		5,98	6,06	5,7
CO	(%)	1,82	1,76	3,23
Pbk	(ppm)	13,0	11,2	24,0
Nt	(%)	0,180	0,175	0,331
CE	(dS m^{-1})	0,25	0,36	0,46
CaCE	(meq l^{-1})	1,96	1,50	2,10
Arena	(%)	41	65	39
Limo		52	24	52
Arcilla		7	11	9
Textura		Fr-I	Fr-A	Fr-I
CIC	(cmolc kg^{-1})	13,6	13,8	20,5
CaCIC		6,5	6,9	10,4
MgCIC		2,0	1,4	2,5
NaCIC		0,1	0,2	0,2
KCIC		1,6	1,2	1,4
S		10,2	9,7	14,5
S/CIC		0,75	0,70	0,71
CaCIC/S		0,64	0,71	0,72
CaCIC/CIC		0,48	0,5	0,51

El suelo de Belgrano es un suelo Argiudol abruptico, familia fina, illítica, térmica [31] que se corresponde con la la serie Udaondo [32], [33]. Es un suelo muy oscuro y profundo, de aptitud agrícola, que se encuentra en un paisaje de lomas muy suavemente onduladas, en posición de loma de la Subregión Pampa Ondulada baja, moderadamente bien drenado, desarrollado a partir de sedimentos loésicos, no alcalino, no salino con pendiente de 0,5-1 %

El suelo de Bellocq es un suelo Hapludol éntico, familia franca gruesa, mixta, térmica [31] que se corresponde con la serie Bolivar [32], [33]. Es un suelo pardo grisáceo oscuro, profundo, poco desarrollado, con aptitud agrícola, se encuentra en un paisaje de lomas medianosas, muy suave a suavemente ondulado de la Subregión Pampa Arenosa, en posición de loma, algo excesivamente drenado, habiendo evolucionado sobre un sedimento eólico franco arenoso con texturas superficiales franco arenosas, no alcalino, no salino, con pendientes de 0-1 %.

El suelo de Inchausti es un suelo Hapludol éntico, familia franca gruesa, mixta, térmica [31] que se corresponde con a la serie Norumbega [32], [33]. Es un suelo profundo, arenoso, con escaso desarrollo, de aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje de cordones medianosos con

relieve suavemente ondulado, en posición de crestas de lomas y medias lomas de la Subregión Pampa Arenosa, algo excesivamente drenado, habiendo evolucionado sobre sedimentos eólico-arenosos, no alcalino, no salino con pendiente predominante de 1 %.

Para el ensayo se pesaron 4 g de suelo seco por duplicado en tubos de plástico de 50 ml y se agregaron 40 ml de soluciones con diferentes concentraciones de Ca (Co) formuladas a partir de una solución madre de 20 meq l⁻¹ de CaCl₂ (cloruro de calcio) en una matriz de 10 meq l⁻¹ de KCl (cloruro de potasio). Las dosis agregadas fueron de 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00; 3,00; 4,00; 5,00; 6,00; 7,00; 8,00 y 9,00 meq l⁻¹. Las suspensiones generadas se agitaron con agitador vaivén horizontal durante media hora (180 rpm y 25 ± 1 °C) y se dejaron equilibrar durante 18 h. Luego de su estabilización, se filtraron utilizando un papel de filtro Whatman N°42 y se analizaron los extractos con el objetivo de cuantificar y la concentración de Ca soluble final en el extracto mediante complejometría con EDTA [34].

En una primera instancia, los resultados se ajustaron en isotermas de adsorción. Las isotermas de adsorción se realizaron relacionando la cantidad de Ca fijado en los coloides por unidad de masa de suelo (Qi, meq g⁻¹), considerando la diferencia entre la concentración del Ca aportado (C0, meq l⁻¹) y la concentración final de Ca en solución (Ci, meq l⁻¹), la masa de suelo (g⁻¹) y el volumen utilizado (l); respecto a la concentración final de Ca en solución (Ci, meq l⁻¹).

Se ajustaron los datos en diferentes tipos de isotermas linealizadas.

Langmuir

$$ci/qi = 1/qmK + ci/qm$$

Ecuación 1. Isotherma de Langmuir linealizada [35], [36]

Donde qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq g⁻¹), ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l⁻¹), K es una constante relacionada con energía de unión y qm es una constante relacionada con la adsorción máxima de la monocapa.

Freundlich

$$\log qi = \log Kf + n \log Ci$$

Ecuación 2. Isotherma de Freundlich linealizada [36], [37]

Donde Qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq g⁻¹), Ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l⁻¹), Kf constante de equilibrio de adsorción relacionada con la energía de enlace en la superficie y n es una constante cuyo valor depende de los coloides.

Van Huay

$$Qi = b + n \sqrt{Ci}$$

Ecuación 3. Isotherma de Van Huay [38], [39]

Donde Qi es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq g⁻¹), Ci es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l⁻¹), n es una constante relacionada con la afinidad del catión a los coloides y b la intersección o teóricamente la cantidad desorbida del Ca.

Tempkin

$$Q_i = B \ln AT + B \ln C_i$$

Ecuación 4. Isoterma de Tempkin [36], [40]

Donde Q_i es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq g^{-1}), C_i es el equilibrio de las concentraciones de Ca en solución (meq l^{-1}), AT es la constante de unión de equilibrio isotérmico de Tempkin y B está relacionado constantemente con el calor de sorción.

En una segunda instancia los resultados se ajustaron en funciones de dosificación. Las funciones de dosificación relacionan la concentración de Ca en equilibrio final (C_i) respecto a la concentración de Ca adsorbida (Q_i). Se ajustaron los valores en ecuaciones lineales y polinómicas de diferentes grados donde se evaluó el ajuste en cada una.

Se seleccionaron las ecuaciones más adecuadas en cada situación a posteriori de considerar el cumplimiento de los supuestos básicos de una regresión (normalidad de residuos, homocedasticidad de varianzas). Se realizaron evaluaciones acerca de la significancia de las regresiones ($p < 0,05$) mediante análisis de la varianza (ANOVA) y de los parámetros (t-Student). El grado de ajuste de cada uno se evaluó mediante el coeficiente de regresión (R^2) y en algunos casos se utilizaron los valores de AIC y BIC, que en valores menores evidencian la simplicidad y pertinencia del modelo. Se realizaron pruebas estadísticas utilizando variables auxiliares con el objetivo de evaluar si los parámetros de las regresiones se diferencian estadísticamente ($p < 0,05$) en aquellos casos donde se ajustaron isotermas similares. Se utilizó el InfoStat® como software estadístico [41].

Resultados

Isotermas de adsorción

El suelo de Bellocq es el único de los tres sitios que presentó buenas correlaciones para los cuatro modelos de estimación por isotermas, siendo las isotermas de Freundlich ($R^2 = 0,960$) y Van Huay ($R^2 = 0,991$) las mejores estimadoras considerando el grado de ajuste y la distribución de los residuos (Figura 2). La isoterma de Tempkin que presentó los peores resultados en este suelo, incluso obtuvo un ajuste R^2 de 0,857, pero sin cumplir con el supuesto de normalidad de residuos. El suelo de Inchausti presentó ajustes adecuados solamente en la ecuación de Van Huay ($R^2 = 0,987$), y en menor medida para el modelo de Langmuir ($R^2 = 0,841$) pero con valores de pendientes y ordenadas al origen más elevados. El suelo de Belgrano se ajustó al modelo de Van Huay con valores elevados ($R^2 = 0,998$), mientras que para el resto de los modelos presentó valores de ajuste muy bajos.

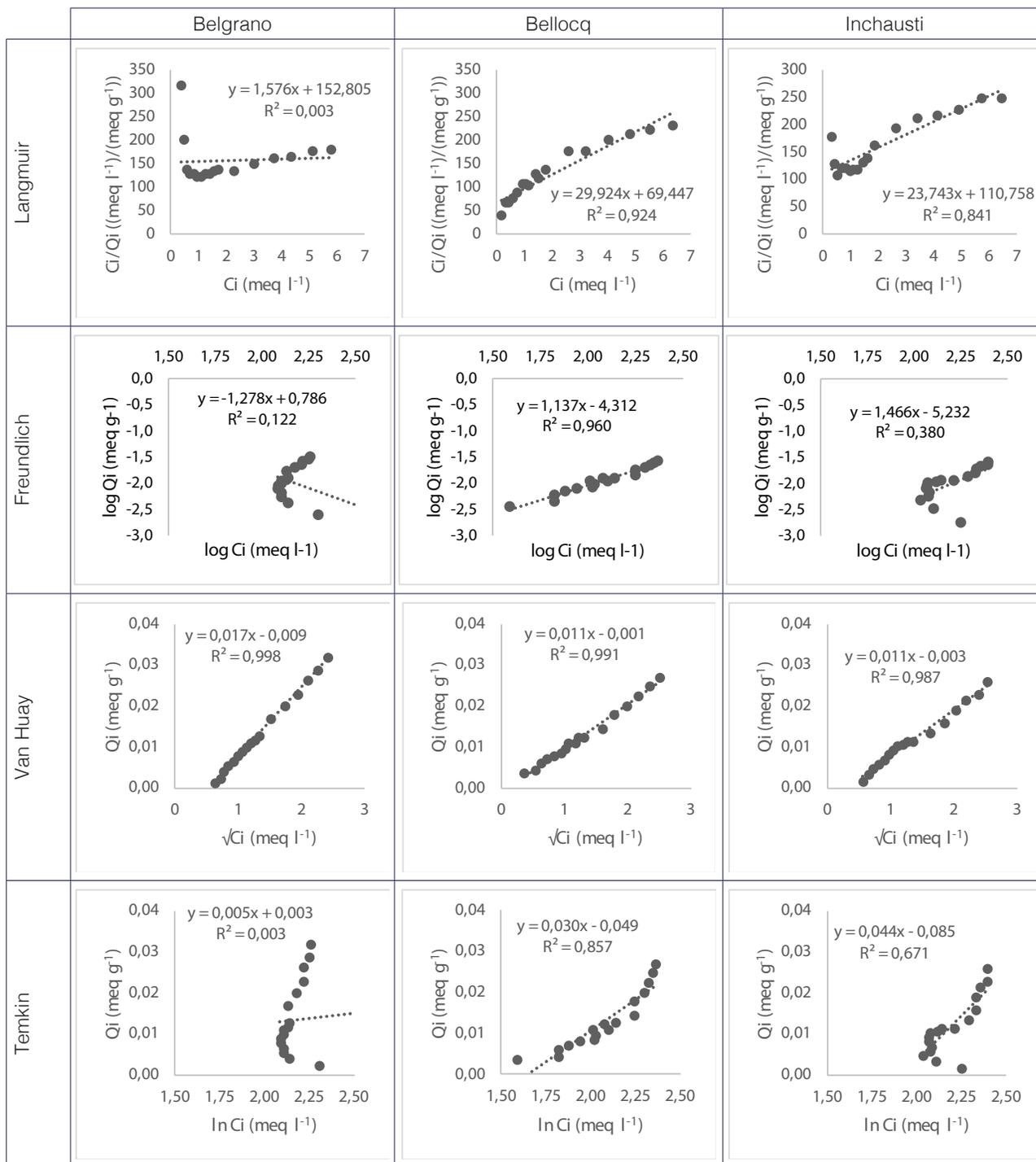


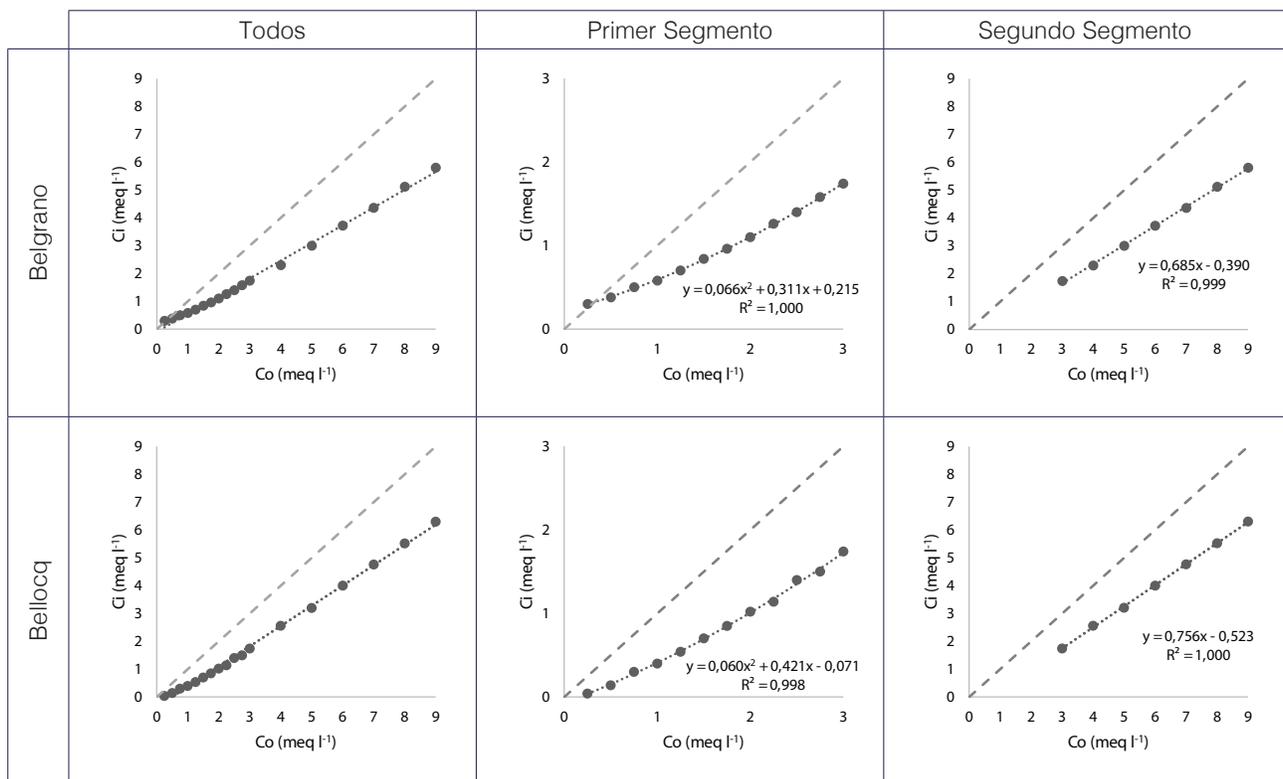
Figura 2. Ajuste de las isotermas de adsorción linealizadas de Langmuir, Freundlich, Van Huay y Tempkin para los suelos de Bellocq, Inchausti y Belgrano con sus respectivas ecuaciones, coeficientes de ajuste y línea de ajuste (punteada). Q_i es la masa de Ca adsorbido por unidad de masa de suelo (meq g^{-1}) y C_i es la concentración de Ca en el equilibrio (meq l^{-1}).

La isoterma propuesta por Van Huay logró ajustarse significativamente en todos los parámetros para los tres suelos estudiados, con elevados valores de ajuste ($p < 0,05$; $R^2 > 0,98$). La isoterma ajustada en el suelo de Belgrano arrojó una pendiente 63% superior y una ordenada al origen

350% menor respecto a los otros suelos. Realizando la comparación entre regresiones con variables auxiliares se observó que la pendiente de la regresión, es decir la tasa de adsorción de Ca ante su aporte, fue significativamente mayor en el suelo de Belgrano respecto a las pendientes de las regresiones de los suelos de Bellocq e Inchausti ($p < 0,01$), que no se diferenciaron entre ellas. Asimismo, la ordenada al origen de la ecuación, relacionada con la cantidad de Ca desorbida, fue menor estadísticamente en el suelo de Belgrano con respecto a los suelos de Bellocq e Inchausti ($p < 0,01$), siendo similar en estos últimos. La isoterma de Freundlich logró ajustarse con significancia en sus parámetros y elevados valores de ajuste solamente con el suelo de Bellocq ($p < 0,05$), aunque la ecuación de Van Huay logró un mayor valor (0,96 vs 0,99). Las restantes combinaciones de las isotermas con los suelos no cumplieron con el supuesto de normalidad de residuos, evidenciando que el comportamiento de Ca ante su aporte no se puede predecir según las condiciones supuestas en cada caso, a pesar de encontrar elevados valores de ajustes en algunos casos.

Funciones de dosificación

Las funciones de dosificación mostraron que no puede ajustarse la totalidad de las concentraciones estudiadas a una ecuación debido a que los resultados no cumplen los supuestos de normalización de residuos. Se observó que subestiman los valores en las concentraciones más bajas, se sobrestiman los valores en las partes medias y se vuelven a subestimar en las partes altas (Figura 3). Ante este comportamiento se observó que se puede dividir el patrón en dos segmentos con comportamiento diferencial en los tres suelos. El primer segmento se corresponde con los tratamientos de 0,25 a 3 meq l⁻¹ que puede ajustarse con ecuaciones polinómicas de segundo grado, mientras que el segundo segmento corresponde a los tratamientos de 3 a 9 meq l⁻¹ que puede ajustarse con ecuaciones lineales.



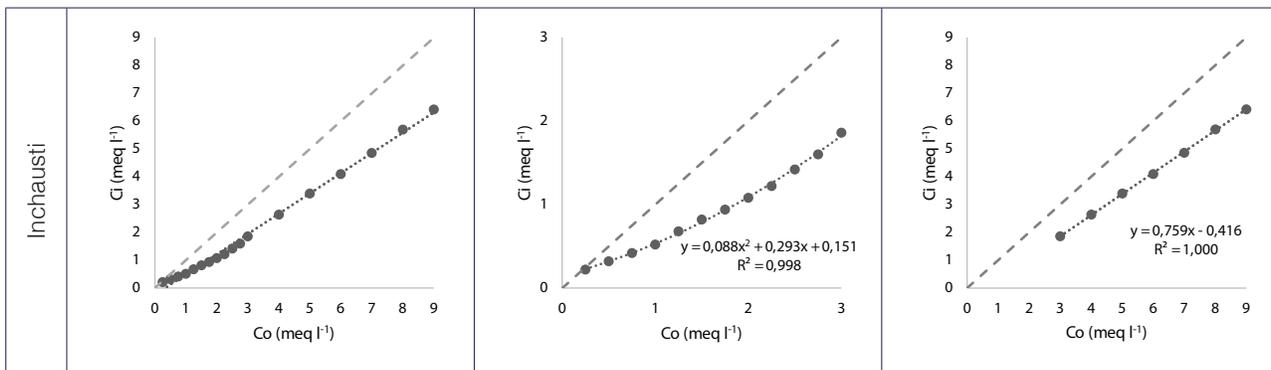


Figura 3. Ajuste de ecuaciones de dosificación para la totalidad los resultados, el primer segmento (Co de 0,25 a 3 meq l^{-1}) y segundo segmento (Co de 3 a 9 meq l^{-1}) para los suelos de Bellocq, Inchausti y Belgrano con sus respectivas ecuaciones, coeficientes de ajuste, línea de ajuste (punteada) y línea 1:1 (líneas discretas). Co es la concentración de Ca en la solución inicial (meq l^{-1}) y Ci es la concentración de Ca en el equilibrio (meq l^{-1}).

Primer Segmento

En los tres suelos, la regresión que mejor se ajustó a los datos obtenidos para este segmento analizado fue un polinomio de grado dos, que al ser de bajo grado cumpliría con el supuesto de simplicidad buscado en el ensayo (Figura 3). Los residuos estuvieron distribuidos de manera azarosa favoreciendo la selección del modelo.

Los valores de significancia y ajuste arrojados por el modelo para el suelo de Belgrano son muy elevados (p -valor $< 0,0001$ y $R^2 = 1$, respectivamente), y los valores de AIC y BIC son considerados bajos (-73,31 y -71,37), indicando una correcta elección del modelo. Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,066 para el término cuadrático (p -valor $< 0,0001$), 0,311 para el término lineal (p -valor $< 0,0001$) y de 0,215 para el término independiente (p -valor $< 0,0001$). La ordenada al origen también presenta un valor positivo de 0,215 indicando un proceso de recuperación de calcio ante el nulo agregado de calcio, evidenciando la desorción de calcio. En cuanto a la tasa de cambio, demuestra valores promedios y por consiguiente un comportamiento de la función intermedio entre los expuestos en los dos suelos anteriores para este segmento, como son 0,3109 de pendiente y 0,0664 como valor multiplicador de la variable cuadrática.

Los valores de significancia del modelo para el suelo de Bellocq (p -valor = 0,005) y los valores de ajuste ($R^2 = 0,998$) son muy elevados, y a su vez, la "solución de compromiso", denominado trade-off, entre la bondad de ajuste del modelo y su complejidad arroja valores negativos, que indican una aceptable calidad del modelo (AIC: -44,55 y BIC: -42,51). Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,060 para el término cuadrático (p -valor = 0,0051), 0,421 para el término lineal (p -valor $< 0,0001$) y de -0,071 para el término independiente (p -valor = 0,0268). La ordenada al origen de este suelo tiene un valor negativo de -0,0855, indicando que ante el agregado de bajas o nulas cantidades de Ca se encontrarían concentraciones de Ca negativas y por ende es una necesidad matemática ya que es irreal. En este caso podría realizarse un análisis de la concentración de equilibrio donde coincida la concentración de calcio agregada con la finalmente medida luego del equilibrio. Matemáticamente habría dos valores, de los cuales, en este caso, el primer valor es negativo, no siendo posible en la realidad. En este caso, se puede mencionar que dicho valor sería 11,04 meq/l. Es evidente que el valor es irreal y solo podría utilizarse con fines comparativos debido su elevada magnitud con respecto al encontrado en suelo. La tasa de cambio de este suelo combina el valor más elevado de la pendiente (0,421) con el valor más bajo que afecta a la variable cuadrática (0,060) por lo tanto la gráfica demuestra un crecimiento cercano al lineal, debido posiblemente a la menor concentración de coloides que interfieren en relaciones de baja complejidad con los cationes.

En el suelo de Inchausti los valores de significancia (p -valor $<0,0001$) y ajuste ($R^2=0,998$) también fueron elevados. El análisis de sus datos de AIC y BIC, justifican aún más esta elección, por arrojar valores bajos que indican buena calidad relativa del modelo (-50,43 y -48,49 respectivamente). Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,088 para el término cuadrático (p -valor $<0,0001$), 0,293 para el término lineal (p -valor $<0,0001$) y de 0,151 para el término independiente (p -valor=0,0002). Este suelo presenta un término independiente positivo (0,151), es decir que a bajas concentraciones agregadas de Ca en el equilibrio se produce una leve desorción de cationes de la solución interna favorecido el aumento de su concentración en la solución externa. En este caso, la raíz en el eje de las abscisas, asociada al equilibrio, se encontraría en 7,81 meq/l, menor concentración que en el primer caso, pero, como se mencionó anteriormente, no son valores tan directo debido a los errores y las interacciones entre iones generadas por la relación suelo/agua elevada. Por otro lado, la tasa de cambio indicó un comportamiento diferente a Bellocq, por presentar el menor valor de pendiente (0,293 vs 0,421) y el mayor valor que multiplica al término cuadrático (0,088 vs 0,060) comportándose entonces de manera más abrupta en los cambios en el gráfico según los tratamientos realizados. Lo anterior puede ser explicado por el mayor porcentaje de coloides en el suelo que incrementan la complejidad del sistema y por lo tanto las interacciones ocurridas en el mismo.

Segundo segmento

La función que mejor se ajuste a los valores correspondientes a este segmento es una regresión lineal para los tres suelos, representada por una recta de pendiente positiva que cumpliría con el supuesto de simplicidad perseguido (Figura 3). Los residuos se encontraron distribuidos de manera azarosa en los tres sitios analizados.

En el suelo de Belgrano los valores de significancia y ajuste del modelo fueron muy altos (p -valor $<0,0001$ y $R^2=0,999$), que son argumentos sólidos para optar por esta función. Sin embargo, los criterios utilizados para evaluar la calidad relativa del modelo fueron más altos (AIC: -18,21 y BIC: -18,37). Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,685 para el término lineal (p -valor $<0,0001$) y de -0,390 para el término independiente (p -valor=0,0014). El valor negativo de la ordenada al origen es una necesidad matemática debido a que no es posible encontrar concentraciones negativas de Ca en suelo. En adición, las elevadas concentraciones donde se realizó no permitirían interpretar certeramente ese resultado. La tasa de cambio, expresada como la recuperación del Ca agregado, se ajustó con un comportamiento lineal asociado a la reducción de las interacciones con los coloides. Más aún, las pendientes encontradas fueron menores a la unidad, evidenciando que no se recupera la totalidad del Ca agregado.

El nivel de significancia alcanzado por el modelo en el suelo de Bellocq también fue muy elevada (p -valor $<0,0001$), al igual que su nivel de ajuste ($R^2=1,000$). La calidad relativa del modelo es buena, justificada por sus valores de AIC y BIC, aunque los mismos no son tan bajos como en otras ecuaciones encontradas (-22,13 y -22,29, respectivamente). Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,756 para el término lineal (p -valor $<0,0001$) y de -0,523 para el término independiente (p -valor=0,0001). En este suelo la variable independiente representa el valor más bajo de los tres suelos analizados para este segmento.

Los valores de significancia y de ajuste en el suelo de Inchausti resultaron ser muy elevados (p -valor $<0,0001$ y $R^2=0,9993$ respectivamente) justificando la elección del modelo, y los de AIC y BIC negativos, pero comparativamente mayores a los encontrados en otras situaciones (-19,09 y -19,26). Los parámetros de la función arrojaron valores de 0,759 para el término lineal (p -valor $<0,0001$) y de -0,416 para el término independiente (p -valor=0,0004). La variable independiente es negativa y similar al suelo de Belgrano, con un valor de -0,416. Su tasa de recuperación es muy similar a la de Bellocq.

Discusion

Isotermas de adsorción

El elevado ajuste del comportamiento del Ca aportado con la isoterma de Van Huay se asocia con la heterogeneidad en los coloides presentes en los suelos debido al material parental que le dio origen (loess), en concordancia con lo mencionado por Hannan (2008), siendo que los suelos de Bellocq e Inchausti pertenecen a la familia mixta y el suelo de Belgrano a familia illítica (Cuadro 1). Según algunos autores [1], [4], este modelo correspondería al tipo “L” quien reflejaría una saturación progresiva de los sitios de adsorción y manifiesta una elevada afinidad del Ca con los coloides del suelo. Así también, y en semejanza con lo encontrado en otras investigaciones [24], la adsorción de Ca no estaría limitada por los sitios de adsorción ya que la selectividad de Ca no sería sustancialmente diferente en la presencia de K, explicado fundamentalmente por la valencia, radio hidratado y concentración de Ca respecto a K. Del mismo modo, no se esperaría encontrar reducciones en las cargas de los coloides por modificaciones del pH ni acomplejamientos entre la MO y el Fe y Al como puede suceder en suelos tropicales [4], [24], [42]. En estos suelos, la principal reducción de la concentración de Ca disponible está afectada por la adsorción a los coloides y precipitación con otros elementos [4].

La similitud en los parámetros de las ecuaciones de Inchausti y Bellocq podría deberse a la mayor semejanza en la cantidad y tipos de coloides existentes en ambos suelos, siendo ambos suelos pertenecientes a la familia mixta. Se observan contenidos similares de CO, arcilla y CIC (Cuadro 1) siendo parte de los principales parámetros edáficos que controlarían su comportamiento [6], [9], [10]. Asimismo, en el suelo de Belgrano la mayor tasa de adsorción (relacionada con la mayor afinidad del Ca a los coloides) y la menor ordenada al origen (relacionada con una mayor capacidad de desorción de Ca en concentraciones bajas) se podría deber al elevado contenido en CO y CIC y a la predominancia del tipo illitas de arcillas, ya que el contenido total de arcilla fue relativamente similar a los restantes suelos (Cuadro 1). En adición, estas características explicarían también el mayor contenido de Ca soluble en el extracto de pasta de saturación observado para este suelo. Estos resultados sugieren que el aumento de materia orgánica del suelo aumenta la capacidad para retener el Ca agregado, y en consiguiente la posibilidad de liberarlo en el mediano plazo, coincidiendo con lo expresado por Samadi (2006). Adicionalmente, el contenido de Pbk del suelo de Belgrano fue mayor respecto a los suelos de Bellocq e Inchausti (Cuadro 1), siendo posible considerar que la mayor tasa de adsorción también podría deberse a la interacción del Ca con este elemento, según los posibles destinos [4] y similar a lo encontrado en otros trabajos cuando se agregó elevadas concentraciones de Ca en presencia de sulfatos (SO_4^{2-}) [24].

Estos resultados no podrían asegurar completamente la funcionalidad de la isoterma de Freundlich [10], ya que solo logró ajustarse correctamente en el suelo de Bellocq. Sin embargo, es importante destacar que algunos autores [10] [5], si bien encontraron para sus suelos mejores resultados en los modelos de Freundlich, hallaron valores de R^2 muy prometedores en el modelo de Van Huay ($R^2 > 0,82$ y $R^2 > 0,91$). Estos estudios realizados, en consecuencia, permitirían suponer que el modelo de Van Huay podría ser utilizado en forma más generalizada en los diferentes suelos de la provincia de Buenos Aires.

En comparación con los resultados encontrados en suelos oxisoles de Brasil [24], utilizando concentraciones de q_i expresadas en mmol kg^{-1} y C_i en mM en el modelo de Freundlich para el suelo de Bellocq con fines comparativos, se observa que el K_f se fue mayor en los suelos argentinos en una magnitud superior al 200% (2,29 vs 6,95), mientras que el parámetro n se

incrementó solamente un 23% (1,39 vs 1,92). El mayor valor de Kf evidenciaría una mayor afinidad entre el Ca con los coloides y/o el Pbk de Bellocq, más que con los suelos de Brasil, según lo expresado por McBride [4].

En resumen, estos resultados sugieren la posibilidad de desarrollar un estudio acerca del comportamiento del Ca en la Región Pampeana similar al realizado en suelos oxisoles [24], como así también en otras bases del suelo [2], [3], [7], [29]. Este estudio preliminar, sin embargo, no permitió evaluar el impacto de los principales parámetros de suelo en extenso como se ha realizado en otros nutrientes [6]. Aun así, la posibilidad de predecir el comportamiento en la disponibilidad de Ca en suelos de la provincia de Buenos Aires permitirá ampliar la base cognitiva para realizar recomendaciones de fertilización cálcica utilizando esta metodología en sitios cada vez más deficientes en este elemento y en donde aún no se considera un nutriente importante para ser analizado [25], [28], a pesar que haya evidencias de respuesta ante su agregado [26], [27], y cuya situación podría agravarse en el futuro si no se modifica el planteo agroproductivo.

Funciones de dosificación

Al analizar los datos de la dosificación arrojados por el software estadístico, también se observó que los comportamientos de los suelos resultaron muy similares. Se decidió realizar este tipo de estudio, porque permite observar los tenores del catión presentes en la solución externa, lo cual es muy importante ya que cuando la regulación de la absorción no puede ejercida por la planta, el suelo tiene que poder ofertarlos en cantidades adecuadas para satisfacer la demanda nutricional como se ha evidenciado en suelos de la Región Pampeana [43], ya que se absorben mayoritariamente por flujo masal, sin tener la planta posibilidad de regularlos.

La determinación de Ca en la solución externa no se realiza en laboratorios con fines diagnóstico, ya que no existen curvas que ajusten dichos valores con el comportamiento de las especies vegetales, por lo cual, este trabajo intenta generar información relacionada a lo expuesto anteriormente, de manera de poder estudiar la disponibilidad de nutrientes in situ, debido a que sería de gran utilidad generar curvas de concentraciones de Ca en la fase líquida como datos iniciales sobre la fertilidad química de los mismos, que permitan iniciar estudios de suficiencia/deficiencia de nutrientes en relaciones directas entre la concentración del Ca y de donde es adsorbido por los cultivos.

Contrario a lo expuesto en algunos trabajos [18] donde se establece que el análisis y estudio de la fase sólida es muy complejo predecir la concentración de nutrientes en la solución externa debido a la complejidad de la interacción entre ellas y a la variabilidad de los métodos de análisis, se pudo encontrar modelos predictivos de concentración de Ca para los tres suelos analizados. Las coincidencias de los resultados encontrados se podrían explicar por la similitud entre los suelos analizados, tanto desde el punto de vista geográfico, de relieve y físico-químico, como también su exposición al mismo contexto productivo, es decir, con historiales productivos semejantes. A pesar de que se menciona que se podrían generar variaciones debido a diferencias en los componentes bióticos y abióticos [20], no se observaron grandes diferencias en los resultados encontrados. Lo antedicho se podría asociar a similitudes en la microflora de los suelos o bien a su baja incidencia en estos estudios. Esta información, en consecuencia, validaría la pertinencia de utilizar estos modelos a nivel regional en aquellos suelos que compartan propiedades similares, con previa corroboración.

Toda la información analizada hasta el momento, sumada a la expuesta en los resultados de este trabajo, podría ser pertinente en la toma de decisiones sobre las dosis de fertilizantes a utilizar para la práctica agrícola de fertilización con nutrientes básicos, favoreciendo la eficiencia en la utilización de los recursos [19], [44] y como demostraron algunos autores que trabajaron

con fertilizantes básicos sólidos [26], [44]. Lo antedicho, fomentaría la respuesta y reposición de nutrientes básicos en zonas donde no se realiza rutinariamente en sistemas productivos extensivos de Argentina.

Este trabajo se suma a todos aquellos realizados con la finalidad de investigar para desarrollar diagnósticos calibrados de nutrientes básicos, entre ellos Ca, partiendo de la base de que la información es muy reducida para las condiciones de cultivos extensivos y suelos de Argentina, particularmente del área templada central de donde pertenecen los tres suelos analizados [28].

Contar con esta información sería muy útil para optimizar el uso de los recursos naturales escasos y promover un sistema de producción agropecuario con bases en la conservación del suelo, permitiendo manejar la problemática de acidificación y su tratamiento mediante la fertilización, con bases científicas, intentando evitar la implementación de las prescripciones generadas por las propias empresas comercializadores de dichos insumos, las cuales suelen carecer de bases teóricas. El estudio de la composición de la solución externa del suelo, como el llevado a cabo en este trabajo, resulta adecuado para no caer en el reduccionismo de los sistemas, y poder estudiar el resultado de los efectos directos de las interacciones del sistema edáfico como un todo [19] [44].

Conclusiones

La isoterma de Van Huay es el modelo más adecuado en la predicción del comportamiento del Ca ante su agregado con fertilizantes en los suelos de Belgrano, Inchausti y Bellocq. La isoterma de Freundlich es pertinente para ser utilizada solamente en el suelo de Bellocq, aunque con menores coeficientes de ajustes. Finalmente, las isotermas de Langmuir y Tempkin no son recomendables para el estudio de Ca en los suelos estudiados.

La función de dosificación de Ca en suelos de la provincia de Buenos Aires puede ajustarse utilizando ecuaciones polinómicas de segundo grado en concentraciones menores a 3 meq l⁻¹ y regresiones lineales en concentraciones mayores a 3 meq l⁻¹.

Referencias

- [1] G. Limousin, J. P. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthès, and M. Krimissa, "Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement," *Applied Geochemistry*, vol. 22, no. 2, pp. 249–275, 2007, doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.09.010.
- [2] S. Bedrossian and B. Singh, "Potassium adsorption characteristics and potassium forms in some New South Wales soils in relation to early senescence in cotton," *Australian Journal of Soil Research*, vol. 42, no. 7, pp. 747–753, 2004, doi: 10.1071/SR03143.
- [3] A. A. Onana, A. D. Mvondo Ze, B. P. Yerima, and V. Agoume, "Comparison of different phosphorous adsorption models in acid forest soils of Bityili (Southern – Cameroon) and their relationship with soil properties," *Int J Biol Chem Sci*, vol. 10, no. 2, p. 820, Sep. 2016, doi: 10.4314/ijbcs.v10i2.30.
- [4] M. McBride, "Chemisorption and precipitation reactions," in *Handbook of Soil Science*, M. Sumner, Ed. London, UK: CRC Press, 2000.
- [5] O. Kenyanya, "Studies on Potassium Requirements por Maize in Nyamira Country," Degree of Master of Science Thesis, Kenyatta University, Kenya, 2015.
- [6] A. Shaviv, S. v Mattigod, P. F. Pratt, and H. Joseph, "Potassium Exchange in Five Southern California Soils with High Potassium Fixation Capacity," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 49, no. 5, pp. 1128–1133, 1985.
- [7] A. Samadi, "Potassium Exchange Isotherms as a Plant Availability Index in Selected Calcareous Soils of Western Azarbaijan Province, Iran," *Turk J Agric For*, vol. 30, pp. 213–222, 2006.
- [8] N. Farheen *et al.*, "Modeling the potassium requirements of potato crop for yield and quality optimization," *Asian J Agri & Biol*, vol. 6, no. 2, pp. 169–180, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/326413345>

- [9] R. Pannu, Y. Singh, and B. Singh, "Effect of long-term application of organic materials and inorganic N fertilizers on potassium fixation and release characteristics of soil under rice-wheat cropping system," *Journal of Potassium Resource*, vol. 19, pp. 1–10, 2003.
- [10] M. Kassa, W. Haile, and F. Kebede, "Evaluation of Adsorption Isotherm Models for Potassium Adsorption under Different Soil Types in Wolaita of Southern Ethiopia," *Commun Soil Sci Plant Anal*, vol. 50, no. 4, pp. 388–401, Feb. 2019, doi: 10.1080/00103624.2018.1563097.
- [11] A. Hannan, "Evaluation of sorption isotherm based soil solution potassium concentration levels for maximizing crop yields," PhD Thesis, University of Agriculture, Faisalabad, Pakistan, 2008.
- [12] P. White, "The pathways of calcium movement to xylem," *J Exp Bot*, vol. 52, pp. 891–899, 2001.
- [13] M. Vázquez and A. Pagani, "Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas," in *Fertilizad de suelos y fertilización de cultivos*, E. H. Echeverría and F. García, Eds. Buenos Aires: INTA, 2015, pp. 317–350.
- [14] E. Kirkby and D. Pilbeam, "Calcium as a plant nutrient," *Plant Cell Environ*, vol. 7, no. 6, pp. 397–405, Aug. 1984, doi: 10.1111/j.1365-3040.1984.tb01429.x.
- [15] A. Kumar, U. M. Singh, M. Manohar, and V. S. Gaur, "Calcium transport from source to sink: understanding the mechanism(s) of acquisition, translocation, and accumulation for crop biofortification," *Acta Physiol Plant*, vol. 37, no. 1, p. 1722, Jan. 2015, doi: 10.1007/s11738-014-1722-6.
- [16] V. N. Chaganti and S. W. Culman, "Historical Perspective of Soil Balancing Theory and Identifying Knowledge Gaps: A Review," *Crop, Forage & Turfgrass Management*, vol. 3, no. 1, p. cftm2016.10.0072, Dec. 2017, doi: 10.2134/cftm2016.10.0072.
- [17] R. Fuentes Flores, "Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánico," Tesis de Maestría, Instituto Interamericano de ciencias agrícolas de la OEA, Costa Rica, 1971.
- [18] S. Navarro Blaya and G. Navarro García, *Química Agrícola*, Segunda Edición. 2003.
- [19] G. H. Bolt, M. F. de Boodt, M. H. Hayes, M. B. McBride, and E. B. de Strooper, *Interactions at the Soil Colloid: Soil Solution Interface*, Primera Edición. Netherlands, 2013.
- [20] V. Snakin, A. Prisyazhnaya, and E. Kovács-Láng, *Soil Liquid Phase Composition*. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [21] D. Jaramillo, "Parte 4. Las propiedades químicas del suelo," in *Introducción a la Ciencia del Suelo*, D. Jaramillo, Ed. Medellín, Colombia, 2002, pp. 295–375.
- [22] X. Zhang and A. Zhao, "Surface charge," in *Chemistry of Variable Charge Soils*, T. Yu, Ed. New York: Oxford University Press, 1997, pp. 17–63.
- [23] H. Fassbender and E. Bornemisza, *Química de suelos con énfasis en América Latina*, Segunda Edición. San José, Costa Rica: Servicio Editorial IICA, 1987.
- [24] E. Marcano-Martinez and M. B. McBride, "Calcium and Sulfate Retention by Two Oxisols of the Brazilian Cerrado," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 53, no. 1, pp. 63–69, Jan. 1989, doi: 10.2136/sssaj1989.03615995005300010012x.
- [25] H. Sainz Rozas, M. Eyherabide, G. Larrea, N. Martínez Cuesta, and H. Angelini, "Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana," *Actas Simposio Fertilidad. FERTILIZAR Asociación Civil*, Rosario, pp. 141–158, 2019.
- [26] H. Fontanetto *et al.*, "Fertilización cálcica en soja en la zona central de Santa Fe. Información Técnica en Cultivos de Verano. Campaña 2011," *Publicación Miscelánea INTA N° 121*. INTA, Rafaela, Santa Fe, pp. 94–99, 2011.
- [27] P. A. Barbieri, H. E. Echeverría, H. R. Sainz Rozas, and J. P. Martínez, "Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols," *Soil Tillage Res*, vol. 152, pp. 29–38, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.still.2015.03.013.
- [28] E. Ciarlo, D. Cosentino, M. García, and F. González, "Análisis de participación de laboratorios de suelos en el programa PROINSA," *Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACS, Tucumán, pp. 45–49, 2018.
- [29] P. Beckett, "Studies on soil potassium II. The 'immediate' Q/I relations of labile potassium in the soil," *Journal of Soil Science*, vol. 15, no. 1, pp. 9–23, 1964.
- [30] Google, "Google Maps," 2022. <https://www.google.com.ar/maps/preview> (accessed Oct. 20, 2022).
- [31] Soil Survey Staff, *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. Washington, DC, Estados Unidos: USDA - Natural Resources Conservation Service, 2014.
- [32] INTA, "Visor GeoINTA. Recuperado el 29 de 8 de 2016." 2016. [Online]. Available: de

- [33] INTA, "Cartas de suelo de la República Argentina. Provincia de Buenos Aires," *Instituto de Suelos INTA*, 2002. <https://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/> (accessed Jul. 28, 2022).
- [34] SAMLA, *Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos*. Buenos Aires: SAGyP, 2004.
- [35] I. Langmuir, "The constitution and fundamental properties of solids and liquids," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 38, no. 11, pp. 2221–2295, 1916.
- [36] K. Y. Foo and B. H. Hameed, "Insights into the modeling of adsorption isotherm systems," *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, no. 1, pp. 2–10, Jan. 01, 2010. doi: 10.1016/j.cej.2009.09.013.
- [37] H. Freundlich, "Over the adsorption in solution," *J. Phys. Chem*, vol. 57, pp. 385–471, 1906.
- [38] H. Pagel and H. van Huay, "Wichtige Parameter der Phosphatsorptionkurven einiger Böden der Tropen und Subtropen und ihre zeitliche Veränderung durch P-Düngung," *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd*, vol. 20, pp. 765–778, 1976.
- [39] H. Abbas, S. Soltana, M. Mahmoud, and M. Nasef, "Sorption-desorption reactions for Zinc and Copper by some newly reclaimed soils in Egypt," *Ann Agric Sci*, vol. 34, no. 1, pp. 407–427, 1996, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/305278830>
- [40] M. Tempkin and V. Pyzhev, "Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalyst," *Acta Phys. Chim. USSR*, vol. 12, pp. 327–356, 1940.
- [41] J. di Rienzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, and C. Robledo, "InfoStat," *Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*, 2016. <http://www.infostat.com.ar> (accessed Jun. 12, 2022).
- [42] R. Zapata Hernandez, *Química de la Acidez*, 1ra ed. Medellín, Colombia: Caragraphis, 2004.
- [43] N. Arrigo and M. Conti, "Importancia de los mecanismos de intercepción radical, flujo masal y difusión de Ca, Mg, K y Na en plantas de maíz en suelos pampeanos," *Revista de la Facultad de Agronomía*, vol. 6, no. 3, pp. 183–188, 1985.
- [44] W. A. Narváez Ortiz, "Desarrollo de Modelos Matemáticos para el Estudio de la Concentración de Elementos en la Solución del Suelo," Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, 2017.

Simulación Monte Carlo de un haz de radiación de una fuente de cobalto 60 en condiciones de referencia

Monte Carlo simulation of radiation beam of cobalt 60 source in reference conditions

Walter Vargas-Segura¹, Anthony Cordero-Ramírez²

Fecha de recepción: 18 de febrero, 2022
Fecha de aprobación: 6 de julio, 2022

Vargas-Segura, W; Cordero-Ramírez, A. Simulación Monte Carlo de un haz de radiación de una fuente de Cobalto 60 en condiciones de referencia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 115-126.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6137>

- 1 Escuela de Física. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Servicio de Radioterapia. Hospital México. Caja Costarricense de Seguro Social. Costa Rica. Correo electrónico: walvargas@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2434-1945>
- 2 Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA). Universidad de Costa Rica. Servicio de Radioterapia. Hospital México. Caja Costarricense de Seguro Social. Costa Rica.
Correo electrónico: anthony.cordero@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2220-1535>

Palabras clave

Simulación Monte Carlo; Geant4; validación; Cobalto 60; porcentaje de dosis en profundidad; perfil de dosis; radioterapia.

Resumen

El propósito de este estudio es generar la simulación y validación de un haz de cobalto 60 de un equipo de radioterapia en condiciones de referencia, mediante el uso de parámetros de evaluación correspondientes a sistemas de planificación comerciales. Para esto, se utilizaron datos de perfiles de dosis y de porcentaje de dosis en profundidad (PDD) para un tamaño de campo de 10 cm x 10 cm a una distancia fuente superficie (DFS) de 80 cm del maniquí de agua. El programa utilizado para la simulación fue el Geant4, incorporando el haz de radiación, un sistema de colimación y el maniquí. Al comparar los resultados de la simulación con los datos medidos, se obtuvo una diferencia de 3.50 % en la región definida entre el máximo de dosis y el 50 % en la curva de PDD, así como una desviación máxima de 0.96 mm en la zona de acumulación del PDD, además de una desviación de 1.42 mm en la zona de penumbra para el perfil dosis. Para la zona fuera del eje central en el perfil de dosis y en la zona de bajas dosis fueron del 2.41 % y del 2.56 %, respectivamente. Por los resultados obtenidos, se realizó la validación de las condiciones simuladas.

Keywords

Monte Carlo Simulation; Geant4; validation; Cobalt 60; percentage depth dose; perfil dose; radiotherapy.

Abstract

The purpose of this study is to generate the simulation and validation of a cobalt 60 beam of a radiotherapy equipment under reference conditions, using evaluation parameters corresponding to commercial planning systems. For this, we used dose profile and percentage depth dose (PDD) data for a field size of 10 cm x 10 cm at a surface source distance (DFS) of 80 cm from the water phantom. The program used to simulate the radiation beam was Geant4, including a collimation system and the phantom. When comparing the simulation results with the measured data, a difference of 3.50 % was obtained in the region defined between the maximum dose and 50 % in the PDD curve, as well as a maximum deviation of 0.96 mm in buildup region in the PDD. In addition, there is a deviation of 1.42 mm in the penumbra region for the dose profile. For the zone outside the central axis in the dose profile and in the zone of low doses, they were 2.41 % and 2.56 %, respectively. Based on the results obtained, this paper validates the simulated conditions.

Introducción

El uso de programas de simulación que permiten la determinación de la distribución de dosis en diferentes materiales, son utilizados ampliamente en clínica e investigación en diferentes ámbitos de trabajo como radiodiagnóstico, medicina nuclear, radioterapia y protección radiológica [1].

Geant4 es uno de estos programas, el cual ha sido desarrollado en el CERN y cuenta con una amplia comunidad a nivel mundial que contribuyen en su mejora constante [2], [3]. Este ambiente de simulación trabaja mediante el lenguaje de programación C++ y puede ser instalado en diversos sistemas operativos [4].

Por décadas los equipos de teleterapia que utilizan fuentes de cobalto 60 han contribuido a la lucha contra el cáncer [5], hay países que aun utilizan estos equipos, incorporándoles mejoras tecnológicas como un colimador multiláminas [6], [7], que les permitan brindar otros tipos de tratamiento como Radioterapia de Intensidad Modulada (IMRT) [8]. En la actualidad, Costa Rica ya no cuenta con este tipo de equipos, pero se cuenta con los datos dosimétricos de unidades que fueron utilizadas en clínica por muchos años. El haz de radiación generado por un haz de cobalto 60, tiene parámetros dosimétricos bien establecidos y reportados [9]. Por lo que, al ser las fuentes cobalto ampliamente estudiadas resulta de gran valor utilizar este tipo de fuente para el ajuste del ambiente de simulación, y delimitar la forma en que se determinará la dosis y a la vez analizar las capacidades computacionales con que se cuenta, previo a la aplicación de esta técnica en otros equipos emisores.

El propósito de este estudio es la simulación Monte Carlo de un haz de radiación generado por una fuente de cobalto 60 de un equipo de teleterapia utilizando el programa Geant4 para su validación con datos dosimétricos en condiciones de referencia.

Materiales y métodos

Parámetros del haz de radiación

Los datos consultados para este trabajo correspondieron a un haz de radiación de una fuente de cobalto 60 que había sido instalada en un equipo de radioterapia de la marca Theratron 780, con una tasa de dosis aproximada de $368.3 \text{ cGy}/_{\text{min}}$ en el momento de la medición de los datos dosimétricos, lo cuales fueron el porcentaje de dosis en profundidad (PDD) y los perfiles de dosis en el plano XY, para un tamaño de campo de 10 cm x 10 cm. En el registro se indica que se utilizó un maniquí de agua de dimensiones de 40 cm x 40 cm x 40 cm de la marca PTW colocado a una distancia fuente superficie (DFS) de 80 cm y una cámara de ionización tipo Semiflex de 0.125 cm^3 de la marca PTW, colocada a 5 cm de profundidad para la medida de los perfiles de dosis.

Simulación

Para este estudio se utilizó una computadora de escritorio de la marca DELL, con un procesador INTEL CORE i7, el ambiente de simulación utilizado en este trabajo fue el programa Geant4 10.7, instalado en el sistema operativo Ubuntu 20.04. No se simuló la fuente radiactiva de Co-60, ni el cabezal del equipo. Lo simulado fue un haz de radiación, de forma plana y circular de 0.5 cm de radio, considerando una apertura máxima del haz de 5° y con las características energéticas para este tipo de fuente radiactiva. Para fines ilustrativos y visualizar la posición del lugar en que se generó el haz de radiación, en la figura 1 aparece un pequeño cilindro cuyo material no interviene en el proceso de simulación.

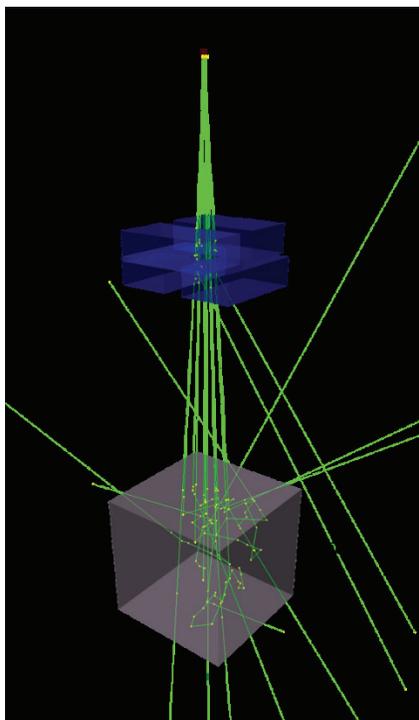


Figura 1. Ilustración de las condiciones de simulación. Las líneas verdes son los rayos gamma generados y dispersados.

Para definir el tamaño de campo se generó en el programa un sistema de colimación que consiste en 4 láminas de plomo de 5 cm de espesor, por 8 cm de ancho y 20 cm de largo. Las láminas que definen el tamaño de campo en la coordenada X, fueron colocadas a 32.5 cm de la fuente y para las láminas de la coordenada Y, fueron colocadas a una distancia de 27.5 cm de la fuente. La posición de las láminas fue modificada para la proyección de un tamaño de campo de $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ a un DFS de 80 cm sobre un maniquí de agua de dimensiones de 30 cm x 30 cm x 30 cm, donde la diferencia en dimensiones respecto al maniquí utilizado en mediciones no es significativa [10] (ver figura 1).

Para verificar el PDD en la simulación, se generó un volumen con las dimensiones de 1 mm x 1 mm x 175 mm, el cual está dividido en segmentos de 1 mm x 1 mm x 1 mm y desplazados para que el centro del primer segmento se encuentre a 1 mm de profundidad. Para el caso del perfil de dosis, se generó un volumen con dimensiones de 20 cm x 20 cm x 0.1 cm dividido en segmentos de 1 mm x 1 mm x 1 mm, colocados a 5 cm de la superficie del maniquí, la cual coincide con la profundidad en que se midieron los perfiles de dosis en el equipo. Y sobre la superficie del maniquí se crea un área con dimensiones de 10 cm x 10 cm en que se contabiliza la fluencia de fotones para obtener el espectro de energía.

Para esta simulación se utilizó en el PhysicsList la biblioteca G4Penelope para la interacción del haz de radiación con la materia y una cantidad de 6.0×10^9 eventos (para obtener el PDD y los perfiles de dosis, en el caso del espectro de energía se generaron 1.0×10^9 eventos). Este paquete fue desarrollado específicamente para simulación Monte Carlo, el cual proporciona resultados confiables para energías que van desde algunos cientos de eV hasta 1 GeV [11].

Análisis de los datos de simulación

J. Venselaar et al. [12] establece una serie de pruebas para comparar datos dosimétricos medidos con los calculados en los sistemas de planificación comerciales, lo cual corresponde a una metodología para su cálculo, límite de confianza y tolerancias. Basado en esta metodología, los resultados de la simulación, fueron comparados con los datos medidos con el maniquí de agua por la cámara de ionización. Además de la validación, el fin es establecer los alcances de la simulación al ser evaluada con estos criterios, considerándolos parámetros máximos alcanzables. El cuadro 1 resume la información separada en regiones, su descripción y la tolerancia en la evaluación de cada una.

Cuadro 1. Parámetros y tolerancias para la evaluación de PDD y perfiles. [12]

Región	Descripción	Campo homogéneo de geometría simple
δ_1	Datos sobre el eje central del campo de radiación para la curva de PDD. Zona de alta dosis y de pequeño gradiente de dosis, hasta el 50 % dosis.	2 %
δ_2	Zona de acumulación en el eje central del campo de radiación en curva de PDD. En la región de penumbra del perfil de dosis, zona de alta dosis y alto gradiente de dosis (región comprendida del 80 % al 20 % del perfil de dosis).	2 mm o 10 %
δ_3	Zona fuera del eje central del campo de radiación, zona de alta dosis y pequeño gradiente de dosis, hasta el 90 % del perfil de dosis.	3 %
δ_4	Zona fuera del haz de radiación, de baja dosis y bajo gradiente de dosis, por debajo del 7 % en el perfil de dosis.	3 % (30 %*)

*El autor propone una tolerancia del 30 % si se utiliza la ecuación 1.

La figura 2 muestra los rangos en que son aplicados y evaluados cada uno de los δ , al ser comparadas las curvas de PDD y perfiles.

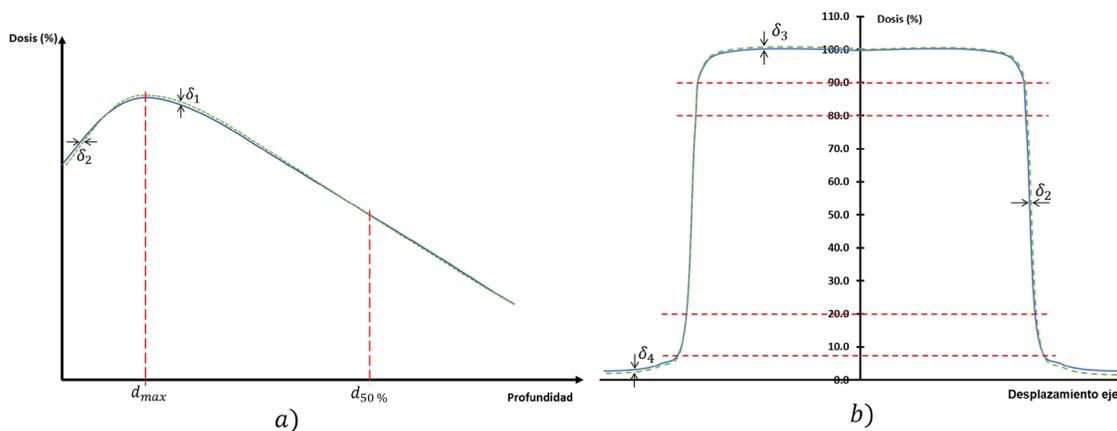


Figura 2. Regiones en que son comparadas las curvas, a) PDD y b) perfil de dosis. Las líneas punteadas delimitan el rango de cada región. Fuente [12]

Los porcentajes para las regiones δ_1 y δ_3 , fueron calculados mediante la ecuación:

$$\delta = \frac{(D_{calc} - D_{med})}{D_{med}} \times 100 \quad (1)$$

D_{calc} es la dosis obtenida de la simulación y D_{med} es resultado de la medida con cámara de ionización. Para el caso de δ_4 el cálculo fue realizado mediante la ecuación:

$$\delta = \frac{(D_{calc} - D_{med})}{D_{med,cax}} \times 100 \quad (2)$$

Para la ecuación 2, $D_{med,cax}$ es la medida de la dosis en el centro del tamaño de campo. Para el caso de δ_2 , este parámetro trata de medir la variación de la posición de la curva de isodosis de determinado porcentaje que se encuentre en esta región. Para este estudio se determinó la máxima variación de las curvas de isodosis del 20 % al 80 %, en pasos de 10 % para los perfiles de dosis; la zona demarcada por estos porcentajes define la penumbra del campo de radiación [13] y para el caso del PDD, la comparación se realizó con los porcentajes obtenidos a las profundidades de 0.1 cm a 0.4 cm, tomando como referencia la curva medida con la cámara de ionización.

Finalmente, J. Venselaar et al., hace referencia al trabajo realizado por Welleweerd y van der Zee W. [14], que introducen una cantidad llamada límite de confianza, como una medida de la evaluación de las pruebas ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$), el cual se basa en la determinación de la desviación media entre el cálculo y la medición para un número de puntos de datos en situaciones comparables y a una desviación estándar (SD) de la diferencia. Esta cantidad fue calculada mediante la ecuación:

$$\Delta = |\text{desviación media}| + 1.5 \cdot SD \quad (3)$$

Aquí se asume una distribución gaussiana de las diferencias entre los valores de dosis calculadas y medidas, siendo el límite de confianza el que determine de manera global si hay o no diferencia. Además, recomiendan el uso del factor de 1.5 en lugar de 1.96. Este valor fue determinado de forma arbitraria y corresponde a una probabilidad $P = 0.065$, valor el cual ha sido descrito por varios autores como un valor útil en la práctica clínica [14], [15]. Para la valoración global de las regiones se toman las tolerancias indicadas en el cuadro 1.

Resultados

La figura 3 muestra la distribución energética obtenida en la superficie del maniquí simulado, en el que se puede apreciar los dos picos característicos de la energía de los fotones emitidos por el estado excitado del Níquel 60, que es parte de los productos del proceso de decaimiento de los núcleos de Cobalto 60. En la simulación se consideró, la generación de un fotón por evento en la fuente, también fue considerada la probabilidad de emisión, que es ligeramente mayor para los fotones con energía de 1.33 MeV, presentado en su esquema de desintegración [16].

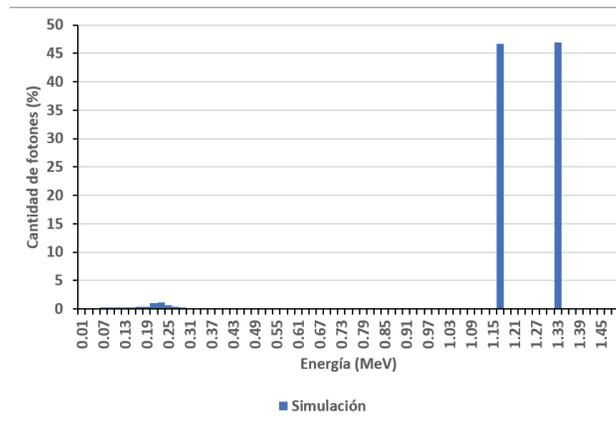


Figura 3. Espectro de energía obtenido en la superficie del maniquí de agua.

La figura 4.a, presenta el espectro mostrado en figura 3 con escala logarítmica en el eje Y para una mejor visualización del porcentaje de fotones contabilizados. En la figura 4.b se observa la contribución de fotones en el espectro de energía por la presencia del maniquí y del colimador.

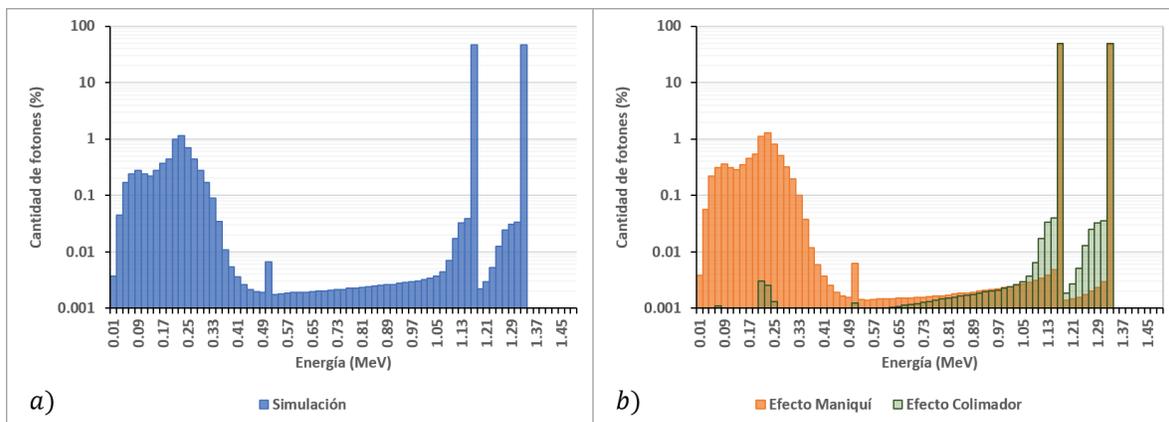


Figura 4. Espectro de energía con escala logarítmica en el eje Y, *a)* Resultado de la simulación y *b)* influencia de los componentes simulados.

La figura 5a muestra el PDD obtenido en la medida con cámara de ionización y lo obtenido del proceso de simulación, en ambos casos los datos fueron normalizados al valor de máxima dosis. En la figura 5b se presentan los resultados de la comparación de los datos simulados con los medidos en la región δ_1 , donde las líneas rojas delimitan en la gráfica la zona de $\pm 2\%$. En la figura 6 se presenta las variaciones en la posición de las curvas de isodosis en la zona de acumulación (δ_2). La máxima desviación encontrada de la curva de isodosis en la zona de acumulación fue de 0.96 mm a la profundidad de 1.0 mm, encontrándose dentro de tolerancia.

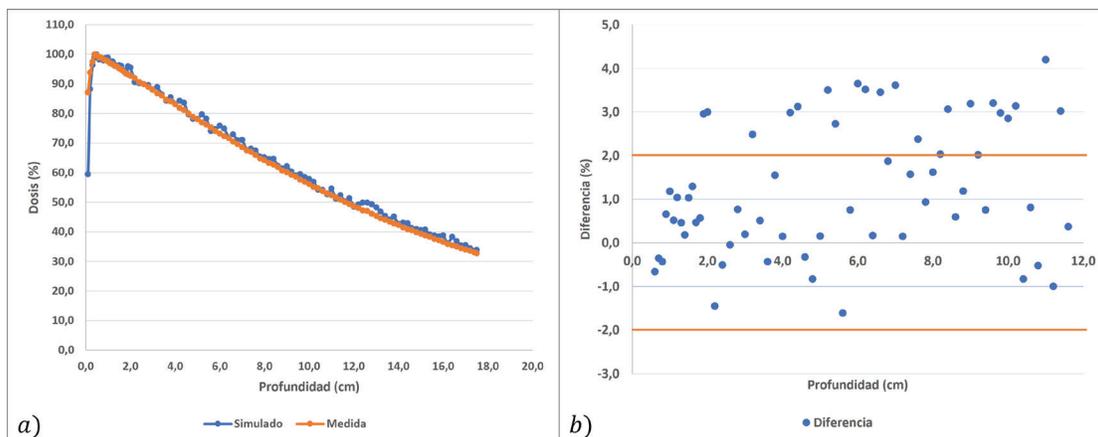


Figura 5. a) PDD simulado y medido. b) diferencia porcentual punto a punto entre PDD simulado y medido.

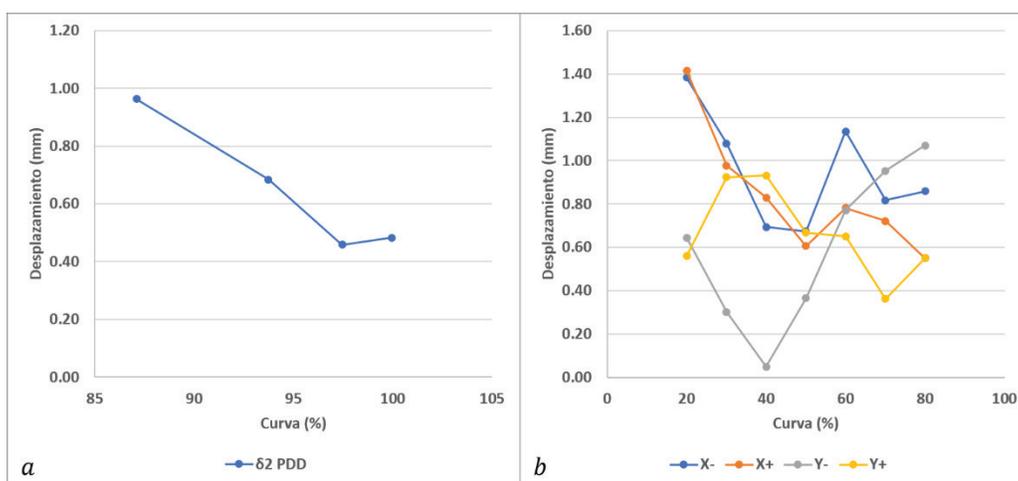


Figura 6. Variación absoluta de la posición de las curvas de isodosis en la región δ_2 , a) en la curva PDD y b) en los perfiles de dosis.

En la figura 7 se muestran los resultados de los perfiles obtenidos, donde se puede apreciar una gran coincidencia entre los datos simulados con los medidos. En más detalle, las figuras 8 y 9 presentan las variaciones de ambos datos en las regiones δ_3 y δ_4 , respectivamente. El resultado de la evaluación global de las comparaciones realizadas se presenta en el cuadro 2.

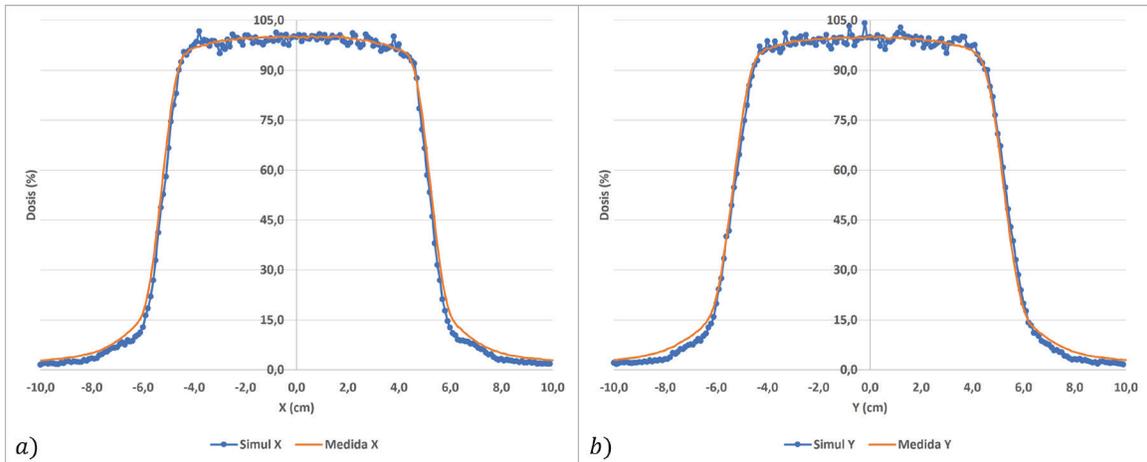


Figura 7. Perfiles de dosis obtenidos del proceso simulación, junto con los valores medidos, a) coordenada X y b) en la coordenada Y.

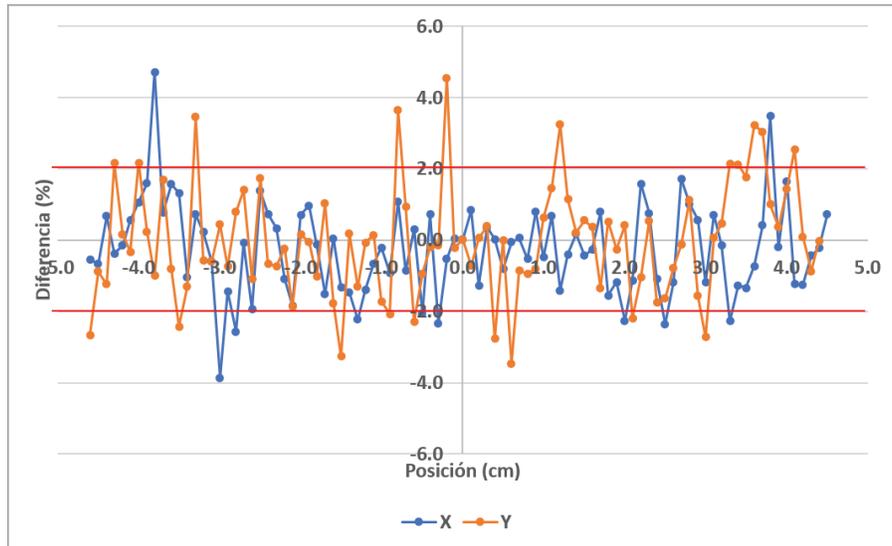


Figura 8. Comparación de los resultados en la región δ_3 .

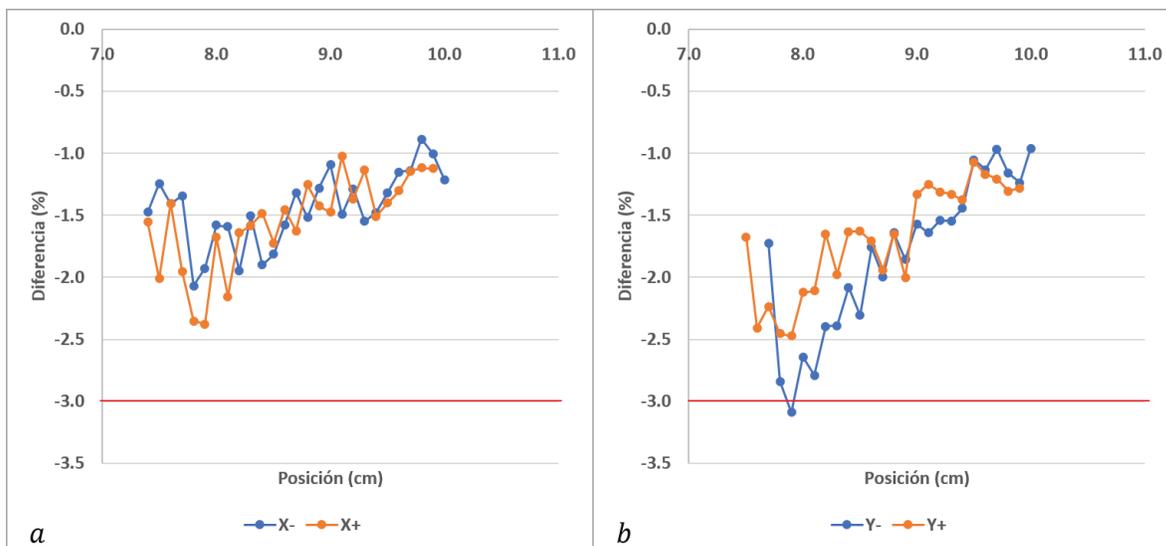


Figura 9. Comparación de los resultados en la región δ_4 , a) en la coordenada X y b) en la coordenada Y.

Cuadro 2. Resultados de los límites de confianza obtenidos en cada región.

Región	Resultado	Tolerancia
δ_1	3.50 %	2 %
δ_2	PDD: 0.96 mm	2 mm o 10 %
	Perfiles: 1.40 mm	
δ_3	Coordenada X: 2.20 %	3 %
	Coordenada Y: 2.41 %	
δ_4	Coordenada X: 2.00 % (46.70 %)	3 % (30 %)
	Coordenada Y: 2.56 % (48.93 %)	

Discusión

El uso de programas la simulación se convierte en una herramienta muy útil en la determinación de los efectos de los elementos presentes en la distribución de dosis [1]. Para este caso, se estudió la influencia de los elementos simulados (colimador y maniquí) en el espectro de energía. La influencia al incluir en la simulación el blindaje de la fuente radiactiva, el cabezal del equipo y el colimador primario se pueden encontrar en diversos trabajos [17]-[19], en que su contribución se da a bajas energías. Al igual que en esos trabajos, lo mostrado en la figura 4 se aprecia el efecto de retrodispersión del maniquí, mientras que la dispersión generada en el colimador, su influencia se aprecia en las energías cercanas a 1.17 MeV y 1.33 MeV. Además, se puede observar un pico en el rango de 0.5 a 0.52 MeV, el cual es debido a la aniquilación de positrones, generados del proceso de formación de pares, en la interacción del haz de radiación primario sobre el sistema de colimación y el maniquí.

Los resultados obtenidos en la región δ_1 , presentan variaciones importantes (figura 5b) y al calcular el límite de confianza se obtuvo un valor de 3.50 % como resultado global de esta prueba, estando por encima de la tolerancia establecida en el cuadro 1. Esto se debe a que

en el proceso de simulación, la medida de la dosis se dio en un medio homogéneo en que el detector de radiación tiene la misma densidad que el maniquí, por lo que no existe perturbación del medio por la presencia del detector [20] y esto es apreciable en la figura 5a, donde la curva de PDD de la simulación presenta valores por encima de los datos medidos en gran parte del intervalo y se confirma con lo mostrado en la figura 5.b en que se aprecia una mayor cantidad de datos en la zona positiva de la gráfica; este resultado es similar al presentado en otros estudios [17]-[19], confirmándose además que la forma y el volumen de la cámara de ionización utilizada en las mediciones influye en el determinación de valores y curva de PDD [21].

Por lo expuesto anteriormente, al trabajar en un medio homogéneo en que no se toma en cuenta el material y movimiento de la cámara de ionización en el ambiente de simulación, se presenta un error sistemático en el resultado del PDD, aunque se obtuvo una diferencia por debajo del 5 % con la cantidad de eventos simulados. De forma similar sucede en la zona de acumulación (δ_2), y es más evidente a profundidades cercanas a la superficie, en que se obtuvieron valores de porcentaje de dosis a la profundidad de un 1,0 mm de 87.11 % para la medida con cámara de ionización y del 59.40 % en el resultado de la simulación. Esto es corroborado por L. Apipunyasopon et al. [22] que en su estudio comparativo demuestra que la forma y el volumen de diversas cámaras de ionización, influyen en la medida de PDD en la zona de acumulación. Por lo que, al no tener iguales condiciones en la determinación de la distribución de la dosis, se opta por utilizar como parámetro de tolerancia, la desviación en la posición de la curva de isodosis expresada en milímetros, en lugar del porcentaje de la diferencia.

Para el caso de los perfiles de dosis se obtuvieron resultados dentro de las tolerancias presentadas en el cuadro 1. En la región de bajas dosis y bajo gradiente de dosis (δ_4) al utilizar la ecuación 1 se presentaron grandes diferencias entre las curvas simuladas respecto a las medidas, esto se debe a que es una zona fuera del campo de radiación, en que las partículas cargadas generadas por la radiación dispersa son quienes depositan la dosis [23], factor que no se toma en cuenta en la simulación. Como se mencionó al analizar el espectro de energía obtenido, existen diferentes factores que producen esta radiación dispersa: el maniquí, la radiación de fuga en el cabezal y la dispersión generada en el sistema de colimación. Los resultados obtenidos se deben a que no se simuló el cabezal y el colimador primario, por lo tanto, también el sistema de colimación empleado en la simulación contribuye a esta diferencia.

El método empleado para la comparación de los datos simulados con los medidos, permitió replantear los valores de tolerancia en las que se toma en consideración las capacidades computacionales con que se cuentan y las condiciones de simulación: 4.0 %, 2.0 mm, 3.0 % y 3.0 %, para las regiones δ_1 , δ_2 , δ_3 , δ_4 , respectivamente. Para el caso de δ_4 , solo utilizando la ecuación 2.

Conclusión

Al utilizar en el presente estudio una unidad de cobalto 60 y el uso de criterios de aceptación utilizados en el comisionamiento de sistemas de planificación de tratamiento comerciales, se tiene las suficientes evidencias para delimitar las condiciones del proceso de simulación con el fin de validarlo y aplicarlo en un posterior trabajo en la determinación de dosis absorbida con variadas condiciones física.

Referencias

- [1] D. W. O. Rogers. "Fifty years of Monte Carlo simulation for medical physics", Phys. Med. Biol., Vol. 51, pp: R287-R301, 2006. DOI:10.1088/0031-9155/51/13/R17
- [2] Geant4 Collaboration (2020, December 4). Toolkit Developers Guide [Online]. Available: <http://cern.ch/geant4>

- [3] J. Allison *et al.* "Recent development in Geant4", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 835, pp: 186-225, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
- [4] Geant4 Collaboration (2020, December 4). Installation Guide [Online]. Available: <http://cern.ch/geant4>
- [5] J. Van Dyk *et al.* "A retrospective of cobalt-60 radiation therapy: the atom bomb that saves lives", Medical Physics International Journal, 4, pp: 327-350, 2020.
- [6] G. Sri Krishna *et al.* "DVH Analysis of Cobalt-60 treatment plans incorporating a recently developed MLC", Int J Cancer Ther Oncol, 4(3):431, 2016. DOI: 10.14319/ijcto.43.1
- [7] K. M. Ayyangar *et al.* "Monte Carlo study of MLC fields for cobalt therapy machine", Journal of Medical Physics, vol. 39, n° 2, pp: 71-84, 2014.
- [8] M. Mathuthu *et al.* "Dosimetric evaluation of cobalt-60 teletherapy in advanced radiation oncology", Journal of Radiotherapy in Practice, Vol. 18, pp: 88-92, 2019. DOI: 10.1017/S1460396918000390
- [9] M. Cohen. "Central axis Depth dose data for use in radiotherapy. General introduction", Br. J. Radiol., 11: Suppl 11, pp: 8-11, 1972.
- [10] IAEA. "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water", Technical Reports Series No.398. Vienna, 2000.
- [11] Geant4 Collaboration (2020, December 4). Guide for Physics Lists [Online]. Available: <http://cern.ch/geant4>
- [12] J. Vanselaar *et al.* "Tolerance for the accuracy of photon beam dose calculations of treatment planning systems", Radiotherapy and Oncology, 60, pp: 191-201, 2001. DOI: 10.1016/s0167-8140(01)00377-2
- [13] H. E. Johns and J. R. Cunningham. "The Physics of Radiology", fourth edition, Springfield, Illinois: Charles C Thomas Publisher, 1983, ch 10, sec 10.13 pp: 369-371.
- [14] J. Welleweerd and W. van der Zee. "Dose calculation for asymmetric fields using Plato version 2.01.", Abstrac in: Proc. Annual ESTRO Meeting, Edinburgh. Radiother Oncol, 48 (suppl. 1): 134, 1998.
- [15] J. Vanselaar and J. Welleweerd. "Application of a test package in an intercomparison of the performance of treatment planning systems used in a clinical setting", Radiother Oncol, 60, pp: 203-213, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8140\(01\)00304-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8140(01)00304-8)
- [16] H. E. Johns and J. R. Cunningham. "The Physics of Radiology", fourth edition, Springfield, Illinois: Charles C Thomas Publisher, 1983, ch. 3, sec. 3.08 pp: 81-84.
- [17] A. Kajaria *et al.* "Monte Carlo simulation of Co-60 teletherapy unit and validation of outcome with dosimetric data published in BJR 25", JBERR, Vol. 2, No. 2, pp: 30-34, 2015.
- [18] J. Won Shin *et al.* "Application of a Geant4 simulation to a ⁶⁰Co therapy unit", Journal-Korean Physical Society, Vol. 59, No. 1, pp: 30-34, 2011. DOI: 10.3938/jkps.59.12
- [19] R. Miró *et al.* "MCNP simulation of a Theratron 780 radiotherapy unit", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 116, No. 1-4, pp: 65-68, 2005. Doi:10.1093/rpd/nci125
- [20] P. Andreo. "Monte Carlo simulation in radiotherapy dosimetry", Radiation Oncology, Vol. 13, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13014-018-1065-3>
- [21] W. Cruz *et al.* "Dosimetric comparison of water phantom, ion chamber, and data acquisition modes for LINAC characterization", Radiation Measurements, Vol. 82, pp: 108-114, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.09.005>
- [22] L. Apipunyasopon *et al.* "An investigation of the depth dose in the build-up region, and surface dose for a 6-MV therapeutic photon beam: Monte Carlo simulation and measurements", Journal of Radiation Research, Vol. 54, pp: 374-382, 2013. DOI: 10.1093/jrr/rrs097
- [23] J. M Bordy *et al.* "Radiotherapy out-of-field dosimetry: Experimental and computational results for photons in a water tank", Radiation Measurements, Vol. 57, pp: 29-34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.06.010>

Germinación in vitro de *Calibrachoa thymifolia* y *Calibrachoa missionica* nativas de la Argentina

In vitro germination of *Calibrachoa thymifolia* and *Calibrachoa missionica* native to Argentina

Leticia Tombion¹, María Andrea Coviella², María Julia Pannunzio³, María Silvina Soto⁴, Paula Bologna⁵

Fecha de recepción: 25 de febrero, 2022

Fecha de aprobación: 23 de junio, 2022

Tombion, L; Coviella, M.A; Pannunzio, M.J; Soto, M.S; Bologna, P. Germinación in vitro de *Calibrachoa thymifolia* y *Calibrachoa missionica* nativas de la Argentina. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 127-133.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6142>

- 1 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Floricultura, Buenos Aires, Argentina.
Correo electrónico: le.tombion@gmail.com
- 2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Floricultura, Buenos Aires, Argentina.
 <https://orcid.org/0000-0003-1281-0660>
- 3 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Floricultura, Buenos Aires, Argentina.
 <https://orcid.org/0000-0003-1328-6784>
- 4 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Floricultura, Buenos Aires, Argentina.
 <https://orcid.org/0000-0002-0407-9567>
- 5 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Instituto de Floricultura, Buenos Aires, Argentina.
 <https://orcid.org/0000-0003-0603-2970>

Palabras clave

Calibrachoa; germinación; in vitro; MS; WPM.

Resumen

Calibrachoa es un género originario de América del Sur que pertenece a la familia Solanaceae. La utilización de semillas de especies de calibrachoa nativas de la Argentina sirve como fuente de variabilidad natural y con fines de investigación, por lo que su germinación in vitro representa una herramienta rápida y confiable frente a otras técnicas de germinación tradicionales. Por ello, en este trabajo se evaluó la germinación in vitro de *C. thymifolia* y *C. missionica* bajo los medios de cultivos Murashige y Skoog y *Woody plant medium*, y se vio que ambos son eficientes para la germinación de estas especies. A su vez, se determinó que, bajo las condiciones de este experimento, *C. thymifolia* logra germinar una mayor cantidad de semillas en un menor tiempo con respecto a *C. missionica*.

Keywords

Calibrachoa; germination; in vitro; MS; WPM.

Abstract

Calibrachoa is a genus native to South America which belongs to the Solanaceae family. The use of seeds of calibrachoa species native to Argentina serves as a source of natural variability and for research purposes, so their in vitro germination represents a fast and reliable tool compared to other traditional germination techniques. Therefore, in this work the in vitro germination of *C. thymifolia* and *C. missionica* was evaluated under Murashige and Skoog and Woody plant medium, and it was found that both are efficient for the germination of these species. In turn, it was determined that, under these conditions, *C. thymifolia* germinates more seeds in a shorter time than *C. missionica*.

Introducción

Calibrachoa es un género de plantas nativo de Sudamérica perteneciente a la familia Solanaceae Adans, subfamilia Cestroideae Schlttdl., tribu Nicotianae G. Don [1]. Abarca 27 especies que se distribuyen desde el Sur de Brasil hasta el Noreste de la Argentina y Uruguay [2]. En la Argentina existen 12 especies nativas de calibrachoa, las cuales son: *C. parviflora*, *C. pygmaea*, *C. longistyla*, *C. caesia*, *C. irgangiana*, *C. excellens*, *C. linoides*, *C. thymifolia*, *C. missionica*, *C. humilis*, *C. pubescens* y *C. ovalifolia* [3]. Estas se pueden encontrar en las llanuras y en los afloramientos rocosos de las regiones subtropicales y templadas del país [1, 2]. Se caracterizan por ser hierbas perennes, menos frecuentemente anuales, o subarborescentes pequeñas, erectas o decumbentes. Poseen tallos cilíndricos de base leñosa, hojas sésiles o subsésiles y flores perfectas, generalmente no aromáticas [4] de una amplia variedad de colores, tales como rosa, violeta, fucsia y amarillo [5]. El lanzamiento de la primera variedad comercial de calibrachoa fue en la década de 1990, por Suntury Ltp (Kanaya et al., 2010) y desde entonces se han registrado numerosos cultivares por diferentes compañías de mejoramiento genético tales como Goldsmith Plants, Ball Flora Plant y Selecta First Class [6]. En la Argentina, el Instituto de Floricultura del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) se dedica actualmente a la domesticación y al mejoramiento genético de calibrachoa con el propósito de obtener, a partir de especies nativas, variedades ornamentales adaptadas a las condiciones del mercado local e internacional, dentro de un marco legal y sustentable del uso de los recursos.

La semilla es un elemento esencial para la supervivencia de las especies [7] y su utilización como fuente de propagación mantiene la variabilidad genética natural, por lo que las plantas obtenidas pueden destinarse a la repoblación de áreas naturales o bien a la investigación [8]. La germinación de semillas se define como un conjunto de procesos metabólicos y morfogénicos que resultan en la transformación del embrión en una plántula que posteriormente será una planta adulta [7].

El cultivo in vitro constituye una herramienta útil para la germinación de semillas que de otra manera no sería posible [8] y favorece al proceso de mejora porque aumenta la variabilidad y la selección de individuos. Además, ofrece un medio rápido y confiable para la propagación debido a las altas tasas de multiplicación a pesar del reducido material vegetal de partida requerido, lo cual garantiza el establecimiento de plantas ex vitro durante todo el año [9, 10]. Por ello, la germinación in vitro se utiliza con éxito en varias especies y ha demostrado ser superior a otras técnicas, tales como la germinación con papel de filtro o en sustratos [11]. Sin embargo, el éxito de la germinación in vitro depende del medio de cultivo, ya que su composición tiene un rol clave en el desarrollo de las plantas [12] al proporcionar sustancias esenciales para el crecimiento de los explantes. A su vez, la respuesta de crecimiento puede resultar diferente entre los distintos medios que se utilicen. Esta respuesta se basa en la interacción de los explantes con los diferentes componentes minerales y sales, y otros elementos presentes en el medio. Estas diferencias constituyen la razón principal de la búsqueda de alternativas de protocolos basados en ambos medios para determinar las óptimas condiciones in vitro para aquellas especies vegetales que aún no han sido estudiadas [13]. El medio de cultivo utilizado con mayor frecuencia es el Murashige y Skoog (MS) [14], mientras que el *Woody plant medium* (WPM) [15] ha demostrado también ser un medio útil para el cultivo in vitro [12].

Dado que existe escasa información sobre la germinación de semillas de las especies de calibrachoa nativas de la Argentina, el objetivo de este trabajo fue evaluar la germinación in vitro de *C. thymifolia* y *C. missionica* en dos medios de cultivos diferentes (MS y WPM), a modo de que sirva como antecedente para futuras investigaciones.

Materiales y métodos

Material vegetal

Frutos maduros de *C. thymifolia* y *C. missionica* fueron colectados de poblaciones naturales del Noreste argentino. Luego fueron llevados al laboratorio donde fueron cortados en forma longitudinal con bisturíes estériles para extraer las semillas. Seguidamente, se realizó su limpieza y posterior almacenamiento en sobres de papel para finalmente almacenarlas a 4° C.

Desinfección de semillas

En primer lugar, las semillas fueron enjuagadas con agua más 500 µL de Tween 20 durante 10 minutos. Posteriormente, fueron inmersas en alcohol 70 % por 1 minuto y transferidas a una solución de hipoclorito de sodio 2,5 % más 500 µL de Tween 20, durante 15 minutos en agitación. Finalmente, se realizaron 3 enjuagues con agua destilada estéril bajo flujo laminar.

Selección de medios de cultivo

Se seleccionaron 2 medios de cultivo: MS y WPM. Se emplearon frascos de vidrio de 55 x 75 mm a los cuales se agregaron 40 mL de medio de cultivo con pH ajustado de 5,6. Posteriormente, fueron esterilizados en autoclave a 121 °C durante 17 minutos.

Siembra y condiciones de cultivo

Las semillas desinfectadas fueron sembradas en los frascos que contenían los medios de cultivo, bajo flujo laminar. Se sembraron 5 semillas por frasco y, al finalizar la siembra, los recipientes fueron sellados con film plástico e incubados en oscuridad a 24 ± 2 °C durante 7 días. Luego, los frascos fueron colocados en una cámara de cultivo a 24 ± 2 °C bajo un fotoperíodo de 16 h y a una intensidad lumínica de 1000 lux.

Transferencia al invernáculo

A los 50 días desde la siembra, las plántulas fueron trasplantadas a macetas de 9 cm de diámetro que contenían sustrato estéril compuesto a base de turba de musgo Sphagnum, compost de corteza fina, perlita y cenizas (tabaco Growmix ®), las cuales fueron cubiertas con bolsas de polietileno transparentes para afrontar el período de adaptación en un invernáculo de aclimatación. Las bolsas fueron retiradas a los 10 días y las plantas fueron llevadas al invernadero de producción.

Variables evaluadas y análisis de datos

Se evaluó la germinación acumulada-en porcentaje-(número de semillas germinadas/total de semillas sembradas) y las mediciones se realizaron cada 10 días hasta los 50 días desde la siembra (dds). Se consideró que las semillas se encontraban germinadas a partir de la aparición de la radícula. A los 60 dds se evaluó la sobrevivencia ex vitro de las plantas (número de plantas que sobrevivieron luego de la aclimatación/total de plantas aclimatadas).

Se utilizó un diseño completamente al azar con dos tratamientos (medios de cultivo) y se realizaron 10 repeticiones para cada especie por cada tratamiento. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza mediante el programa Infostat versión 2020 [16].

Resultados y discusión

La germinación in vitro de las semillas de *C. thymifolia* y de *C. missionica* se inició a los 10 dds con la presencia de radícula, seguido de un rápido crecimiento y desarrollo de las plantas tanto en MS como en WPM (Figura 1). Investigaciones llevadas a cabo en otras especies también resultaron en una germinación in vitro a los 10 días, como encontraron Martínez-Cruz y otros [17] en semillas de *Rubus adenotrichus*.

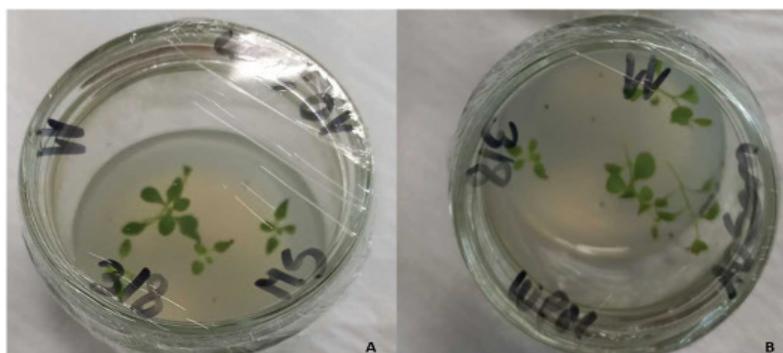


Figura 1. Plántulas de *C. missionica* a los 15 días desde la siembra en MS (A) y WPM (B).

Realizado el análisis estadístico se observó que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos analizados para cada una de las especies de calibrachoa, por lo que el efecto de los medios de cultivo MS y WPM sobre la germinación fue similar. Estos resultados coinciden con los hallados por Urías Valdez [18], quien encontró que las semillas de *Lippia palmeri* germinaron en cantidades significativamente iguales tanto en MS como en WPM. A su vez, estos óptimos valores coinciden con lo obtenido por Flores García y otros [19], quienes descubrieron una apropiada germinación de *Nolina parviflora* en MS. Por su parte, Ruíz y otros [8] también lograron una adecuada germinación de semillas de *Encyclia adenocaula* en este medio de cultivo. Sin embargo, estos hallazgos difieren de los obtenidos por Rodríguez y otros [11] quienes vieron que la germinación in vitro de *Ugni molinae* en MS se vio afectada, posiblemente, debido a su alto contenido de sales, el cual disminuye el potencial hídrico y provoca una menor disponibilidad de agua para las semillas. También difieren de lo expuesto por Quintero-García y otros [20], que afirman que el medio WPM no tiene la suficiente concentración de nitrógeno para mantener el crecimiento de los embriones y, por tanto, dificulta el proceso de germinación. A diferencia de ello y en concordancia con lo obtenido durante esta investigación, Costa Araruna [13] indica que se han obtenido resultados positivos con el uso de WPM por tener un contenido reducido de macronutrientes.

Por otra parte, los resultados de este trabajo demostraron que, a medida que transcurrió el tiempo (en días), se incrementó la germinación tanto para *C. thymifolia* como para *C. missionica* en ambos medios de cultivo (Figuras 2 y 3). Inicialmente, se observó una tendencia exponencial de la germinación en ambos medios de cultivo para las dos especies. Particularmente, en *C. thymifolia* se observó que la germinación se duplicó a los 20 dds, mientras que en las semillas de *C. missionica* cultivadas en MS se cuadruplicó y se mantuvo casi constante en WPM. A su vez, se evidenció una diferencia en los tiempos de germinación para cada una de las especies en los distintos medios de cultivo. El 50 % de la germinación de *C. thymifolia* se dio a los 20 dds, mientras que en *C. missionica* entre los 40 y los 50 dds. Estas diferencias pueden deberse a que se trata de dos especies distintas, en las cuales el espesor y la composición química de la testa pueden variar e interferir en la permeabilidad del agua en las semillas y, por lo tanto, retrasar la germinación, tal como alegaron Rodríguez-Ruíz y otros [21] en semillas de cactáceas, lo cual pudo haber sucedido en el caso de *C. missionica*.

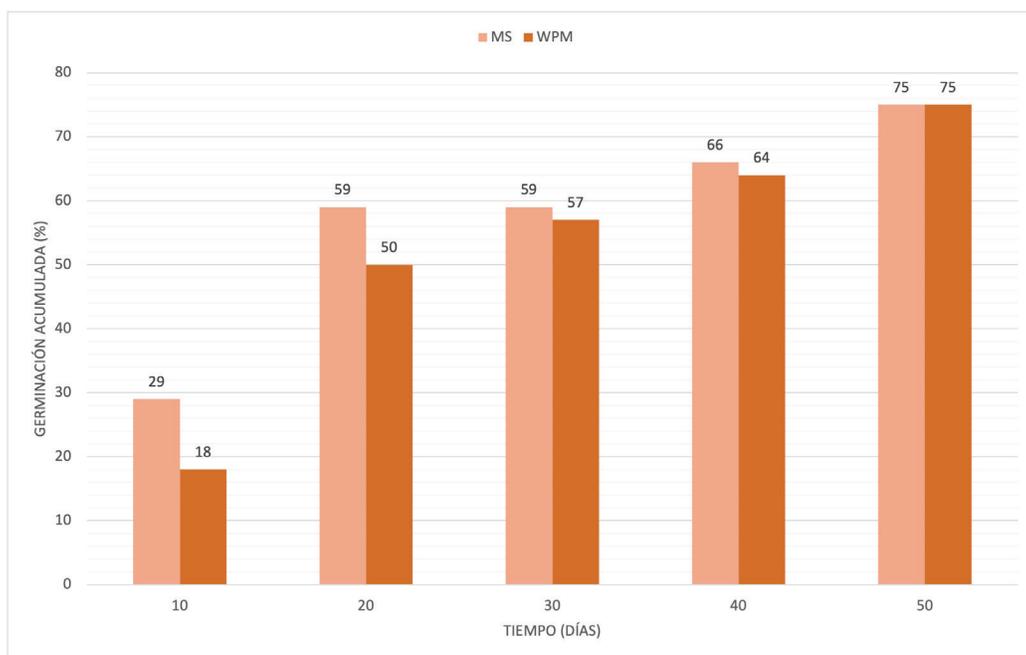


Figura 2. Germinación de *C. thymifolia* en los tratamientos MS y WPM en función del tiempo (días).

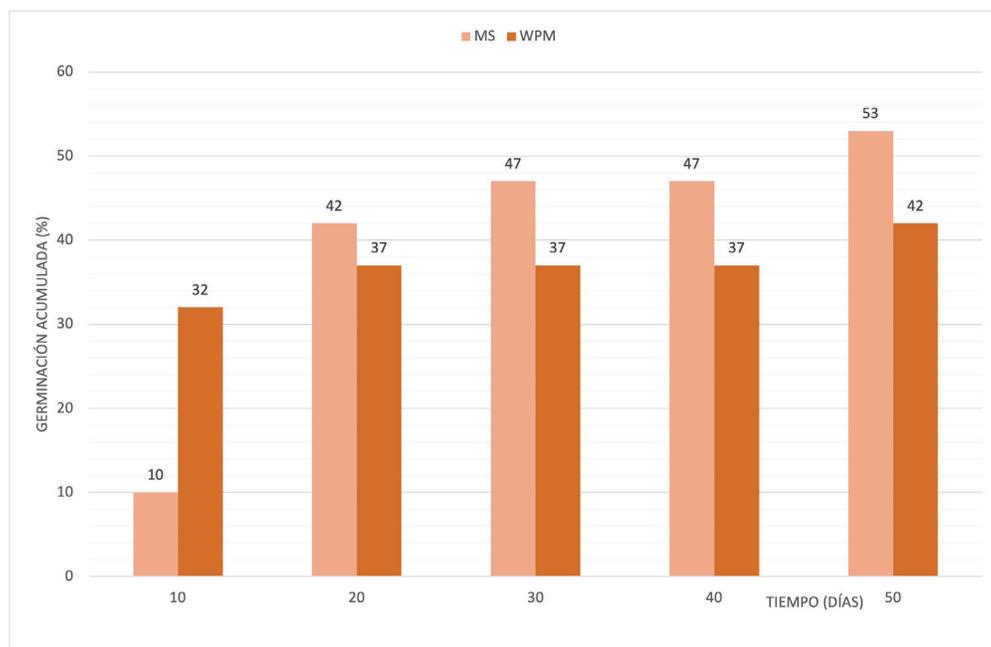


Figura 3. Germinación de *C. missionica* en los tratamientos MS y WPM en función del tiempo (días).

Finalmente, las plantas regeneradas mediante la germinación de semillas in vitro fueron aclimatadas con éxito en condiciones de invernadero, ya que su sobrevivencia ex vitro fue de casi el 100 %.

Conclusión

Bajo las condiciones de este experimento, tanto el medio MS como WPM son adecuados para la germinación in vitro de *C. thymifolia* y *C. missionica*. A su vez, ante estas circunstancias, las especies demostraron una diferencia en tiempos de germinación, puesto que *C. thymifolia* resulta la especie que logra germinar una mayor cantidad de semillas en un menor tiempo. Estos conocimientos sirven de apoyo como paso previo a futuros estudios de mejoramiento genético. Hasta donde se sabe, este es el primer informe de germinación in vitro de especies silvestres de *Calibrachoa* nativas de la Argentina.

Referencias

- [1] ALW. John, G. Mäder, JN. Fregonezi, L. Freitas. "Genetic diversity and population structure of naturally rare *Calibrachoa* species with small distribution in southern Brazil". *Gen. Mol. Biol.*, vol 42, no. 1, pp. 108-119, 2010.
- [2] G. Mäder, LB Freitas. "Biogeographical, ecological and phylogenetic analyses clarifying the evolutionary history of *Calibrachoa* in South American grasslands". *Mol. Phylogenet. Evol.*, vol. 141, pp. 1-10, 2019.
- [3] JA. Greppi, JC. Hagiwara, R. Stehmann R. "Las especies argentinas de *Calibrachoa* (Solanaceae)". *XXXIV Jornadas Argentinas de Botánica*. La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2013.
- [4] Anónimo (marzo, 2018), Flora Argentina [Online]. Disponible en: <http://www.floraargentina.edu.ar/>
- [5] JA. Greppi, JC. Hagiwara, R. Stehmann R. "Novedades en *Calibrachoa* (Solanaceae) y notas taxonómicas sobre el género para la Argentina". *Darwiniana*, vol. 1, no. 1, 2013.
- [6] MS. Soto, JC. Hagiwara, MJ. Pannunzio, S. Stancanelli, G. Facciuto. "Evaluación de clones selectos del género *Calibrachoa* para su uso en cantero". *IV Congreso argentino de Floricultura y plantas ornamentales*, p. 143. Corrientes, Argentina: Ediciones INTA.

- [7] JR. Méndez Natera, JF. Merazo Pinto, NJ. Montañó Mata. "Relación entre la tasa de imbibición y el porcentaje de germinación en semillas de maíz (*Zea mays* L.), caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) y quinchoncho (*Cajanus cajan* L. Mill.). *Rev. UDO Agríc.*, vol 8, no. 1, pp. 61-66, 2008.
- [8] BC. Ruíz, CA. Laguna, ALG Iglesias, A. Damon, HTNJ. Marín, RHS. Azpíroz, MJL. Moreno. "Germinación in vitro de semillas de *Encyclia adenocaula* (La Llave & Lex.) Schltr (Orchidaceae)". *Rev. Inter. Bot. Exp.*, vol. 77, pp. 203-215, 2008.
- [9] Y. García-Ramírez, M. Freire-Seijo, M. Tejada, M. Reyes. "Germinación in vitro de semillas de *Dendrocalamus strictus* (Rosb.) Nees". *Biot. Veg.*, vol. 7, no. 1, pp. 41-44, 2007.
- [10] HJ. du Plessis, R. Vassileva, R. Kleynhans, BA. Egan. "In vitro seed germination and seedling performance of *Hibiscus coddii* subsp. *Barnardii*". *Ornam. Hortic.*, vol. 26 no. 4, 2020.
- [11] M. Rodríguez, M. Chacón, R. Carrillo. "Efecto de la concentración y de los componentes del medio de cultivo MS sobre la germinación in vitro de *Ugni molinae*". *Bosque*, vol. 35, no. 1, pp. 119-122, 2014.
- [12] B. Valizadehkaji, A. Ershadi, M. Tohidfar. "In vitro propagation of two Iranian commercial pomegranates (*Punica granatum* L.) cvs. 'Malas Saveh' and 'Yusef Khani'". *Physiol. Mol. Biol. Plants*, vol. 19, no. 4, pp. 597-603, 2014.
- [13] E. Costa Araruna, JP. Riveiro-Oliveira, VJ. Pereira, SA. Asmar, B. De melo. "Salt concentrations in culture media for the development of *Dipteryx alata* in vitro" *Pesq. Agropec. Bras.*, vol. 52, no. 12, pp. 1295-1300, 2017.
- [14] T. Murashige, F. Skoog. "A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures". *Physiol. Plant.*, vol. 15, pp. 473-497, 1962.
- [15] G. Lloyd, B. McCown. "Commercially feasible micropropagation of mountain laurel *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture". *Int. Plant Prop. Soc. Comb. Proc.*, vol. 30, pp.421-427, 1980.
- [16] Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada. Grupo Infostat. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2020.
- [17] NS. Martínez-Cruz, K. Arévalo-Niño, MJ. Verde-Star, A. Oranday-Cárdenas, C. Rivas-Morales, J. Treviño-Neávez, ME. Morales-Rubio. "Germinación in vitro e inducción de callo en *Rubus adenotrichus* Schltdl". *Polibot.*, vol. 35, pp. 99-107, 2013.
- [18] J. Urías Valdez. "Propagación de *Lippia palmeri* Watson por cultivo de tejidos". Trabajo final presentado para acceder al título de Licenciado en Biología. Departamento de investigaciones científicas y tecnológicas. Universidad de Sonora, Sonora, México, 2014.
- [19] A. Flores-García, JGA. Moctezuma, JL. Rodríguez, A. Corona Ambris. "Germinación in vitro de semillas de *Nolina parviflora* (H.B.K.) Hemsl." *Forest. Veracruz.*, vol. 10, no. 2, pp. 27-33, 2008.
- [20] OD. Quintero-García, S. Jaramillo-Villegas. "Rescate y germinación in vitro de embriones inmaduros de cedro negro (*Juglans neotropica* Diels)." *Acta Agron.*, vol. 61, no. 1, pp. 52-60, 2012.
- [21] ER. Rodríguez-Ruíz, WA. Poot, JA. Rangel-Lucio, HV. Huerta, OJG. Gaona, JT. Carreón. "Germinación in vitro de *Biznaga cabuchera*". *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 9, no. 3, pp. 691-699, 2018.

Comportamiento de la intensidad de turbulencia en distintas áreas transversales en un túnel de viento

Turbulence intensity behavior in several wind tunnel cross-sectional areas

Gustavo Richmond-Navarro¹, Carlos Arias-Arguedas², Pedro Casanova-Treto³

Fecha de recepción: 10 de marzo, 2022

Fecha de aprobación: 17 de agosto, 2022

Richmond-Navarro, G; Arias-Arguedas, C; Casanova-Treto, P. Comportamiento de la intensidad de turbulencia en distintas áreas transversales en un túnel de viento. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 134-144.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6157>

1 Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: g-richmond@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

2 Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: carlosluis111@estudiantec.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-0463-353X>

3 Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: pedro.casanova@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-8508-6293>

Palabras clave

Túnel de viento; intensidad de turbulencia; velocidad de viento; turbina eólica; rotor.

Resumen

Considerando que cada vez más turbinas eólicas operan en condiciones de turbulencia, este estudio sobre la intensidad de turbulencia (TI) en distintas áreas transversales en un túnel de viento se llevó a cabo. Un túnel de viento con un área de pruebas de 15 m de largo, 3.6 m de ancho y 2 m de alto se utilizó; se colocó una cuadrícula de madera para generar turbulencia en el flujo y la velocidad del viento se midió con un anemómetro de hilo caliente. Para determinar si hubo variaciones en la TI se definieron cinco puntos (centro, arriba, abajo, izquierda y derecha) en cuatro áreas transversales luego de la cuadrícula de madera. Se determinó que la TI varía drásticamente dentro del área. Se calculó un porcentaje de error desde 3.6 % a 15.2 % cuando se consideraba la variación de la turbulencia dentro del área del rotor en comparación con cuando se usa solamente el punto en el eje del rotor. Para poder describir apropiadamente el flujo turbulento es necesario considerar el promedio de las mediciones de la turbulencia alrededor del área que cubre el rotor.

Keywords

Wind tunnel; turbulence intensity; wind speed; wind turbine; rotor.

Abstract

Considering that more and more wind turbines operate at high turbulent flows, a study of the turbulence intensity (TI) in several wind tunnel cross-sectional areas was done in this paper. A wind tunnel with a test section 15 m long, 3.6 m wide and 2 m high was used; a wooden grid was placed to generate turbulence and the wind velocity was measured with a hot wire anemometer. To determine if there are significant variations of the TI value, five points (center, up, down, left, and right) at four tunnel cross-sections downstream from the grid were measured. It was determined that the TI varies drastically within the area. An error rate from 3.6 % up to 15.2 % occurred if the TI is considered only at the cross-sectional axis; to truly describe the turbulent flow it is necessary to use the average of the measurements taken in the cross-sectional area.

Introducción

Las turbinas eólicas son usualmente instaladas en ubicaciones de baja turbulencia, sin embargo, el desarrollo urbano junto con la creciente ocupación de campos eólicos en tierra ha creado un mercado para la instalación de turbinas en lugares de mayor irregularidad superficial, como zonas boscosas o cerca de comunidades desarrolladas [1]. En estas regiones la velocidad del viento es variable, registrándose moderada ($0.15 > TI > 0.10$) a alta ($TI \geq 0.15$) intensidad de turbulencia (TI, por su nombre en inglés) [2]. TI se define como la razón entre la desviación estándar muestral y la velocidad promedio del viento en un mismo periodo [3].

Es por esta razón que numerosos estudios se enfocan en el efecto de la turbulencia sobre el rendimiento de las turbinas eólicas. Se ha realizado una comparación entre las turbinas de eje horizontal con las de eje vertical; encontrándose que las turbinas de eje horizontal en pequeña escala superan su contraparte vertical, sin embargo, estas requieren mayor mantenimiento debido a ser más afectadas por las condiciones del viento [4]. El efecto del viraje en condiciones turbulentas también es investigado, donde con la presencia de un concentrador de flujo se consiguió mejor rendimiento de la turbina cuando el viraje se encontraba en un ángulo entre

0° y 20° con vientos en velocidades moderadas a altas [5], [6], [7]. Hay estudios enfocados en los efectos de la turbulencia sobre microturbinas aumentadas con difusores donde se obtiene un incremento en el coeficiente de rendimiento comparado con su contraparte regular [8], [9]. Finalmente, la TI se relaciona con la recuperación de estela; a mayor TI se consigue una recuperación más veloz debido a la energía cinética turbulenta de estela [10], [11].

Otros estudios que lidian con turbinas en flujos turbulentos reportan que bajo estas condiciones la turbina puede producir ligeramente más potencia que bajo flujos más laminares [12]. También, a bajas velocidades la alta turbulencia puede resultar en un aumento en la cantidad de energía producida [13]. Otros investigadores concluyen que la TI no tiene un efecto significativo sobre la potencia producida por las turbinas [14].

El fenómeno de alta turbulencia en perfiles aerodinámicos usualmente implica la comparación entre simulaciones numéricas y mediciones experimentales [15] y necesita el uso de modelos muy específicos de turbulencia para considerar las particularidades de la zona límite, así como los bordes del perfil [16]. La optimización de la geometría del perfil es un área donde las simulaciones computacionales, junto con resultados experimentales, han ayudado a determinar que una geometría optimizada atrasa la separación del flujo, lo cual incrementa la potencia obtenida por 7.5 % [11]. En [17] tres diferentes geometrías de generadores de vórtices se pusieron a prueba, una rectangular, triangular y una Clark-Y; esto debido a que los generadores de vórtices pueden ser utilizados para optimizar el flujo en las aspas de las turbinas, esto puede mejorar la energía anual producida de 1% a 3%. No obstante, otros estudios concluyen que las simulaciones numéricas no son suficientes para describir adecuadamente las condiciones del viento alrededor del perfil; en una de estas se descubrió una relación inversa entre la velocidad del flujo del jet y el coeficiente de arrastre [18].

La literatura a menudo considera la TI solamente en el eje de giro de la turbina dentro del túnel de viento o en pruebas en campo, dejando por fuera la variación de la TI en otras partes del área barrida por el rotor, obviando que esta puede variar en este espacio. [19] muestra una colección de puntos de medición en el área barrida por el rotor, pero no detalla como es que varía la intensidad de turbulencia en dicha área.

Como se indica por [20], los estudios que lidian con las fluctuaciones con la velocidad del viento deben ser muy detallados para describir correctamente las condiciones reales del viento y sus efectos sobre el rendimiento de la turbina; también se da a saber que las turbinas eólicas a pequeña escala no han sido ampliamente investigadas. Más aún, [6] reconoce que hay una ausencia de literatura que se enfoque sobre los efectos de bajos números de Reynolds sobre la TI. En la poca literatura disponible donde se considera el efecto de la TI sobre la producción de potencia los rangos varían de bajo a moderados, como lo es el caso de [19] en donde se usan valores de TI de 1.4 %, 8 % y 13.5 %.

Es de mucha importancia saber en detalle las características del flujo a través de una turbina, especialmente en condiciones de alta turbulencia. Así, este estudio presenta un análisis detallado de la TI dentro de un túnel de viento sobre el área barrida por un rotor a distintas distancias de la cuadrícula de madera.

Materiales y métodos

Equipo

Las pruebas fueron llevadas a cabo en un túnel de viento de capa límite en el Instituto de investigación para mecánica aplicada (RIAM, por su nombre en inglés) en la universidad de Kyushu en Japón. Una ilustración esquemática del túnel se muestra en la Figura 1.

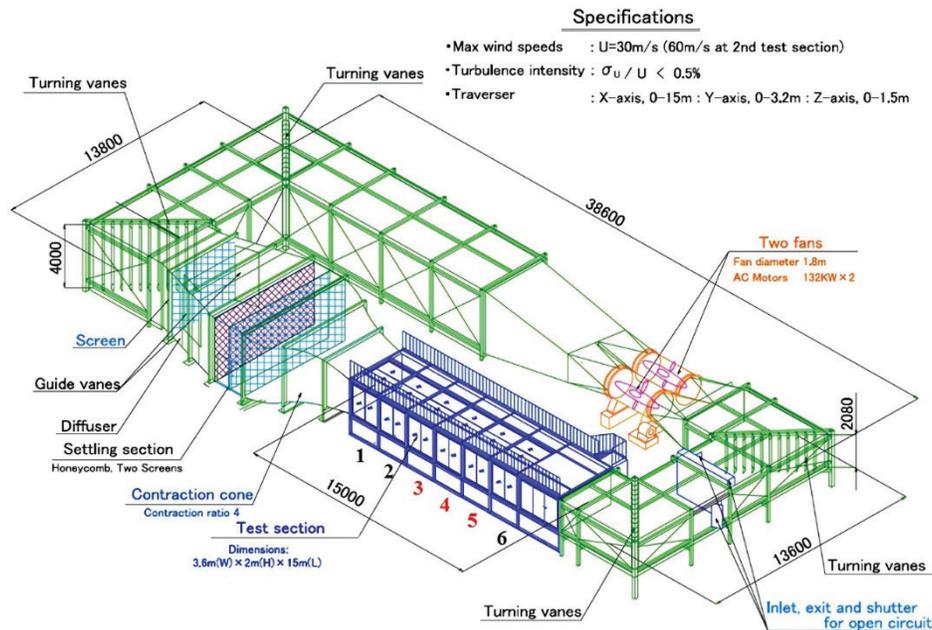


Figura 1. Túnel de viento de capa límite, Universidad de Kyushu. Fuente: [21].

La sección de prueba es de 15 m de largo, 3.6 m de ancho y 2 m de alto. Las características técnicas del túnel se pueden consultar en [21]. Hay 9 paneles removidos en la sección de prueba para reducir el efecto de bloqueo [22], [23], así como los paneles laterales en las secciones 3, 4 y 5 del túnel de la figura 1. El panel 3 en el lado derecho (visto desde la dirección del flujo) está parcialmente removido. Esta configuración del túnel ha sido utilizada con éxito en investigaciones como [24] y [25].

La turbulencia fue generada con la cuadrícula de madera de la figura 2, con las siguientes dimensiones: $M = 156.2\text{ mm}$, $b = 43.5\text{ mm}$ y $t = 29.9\text{ mm}$.

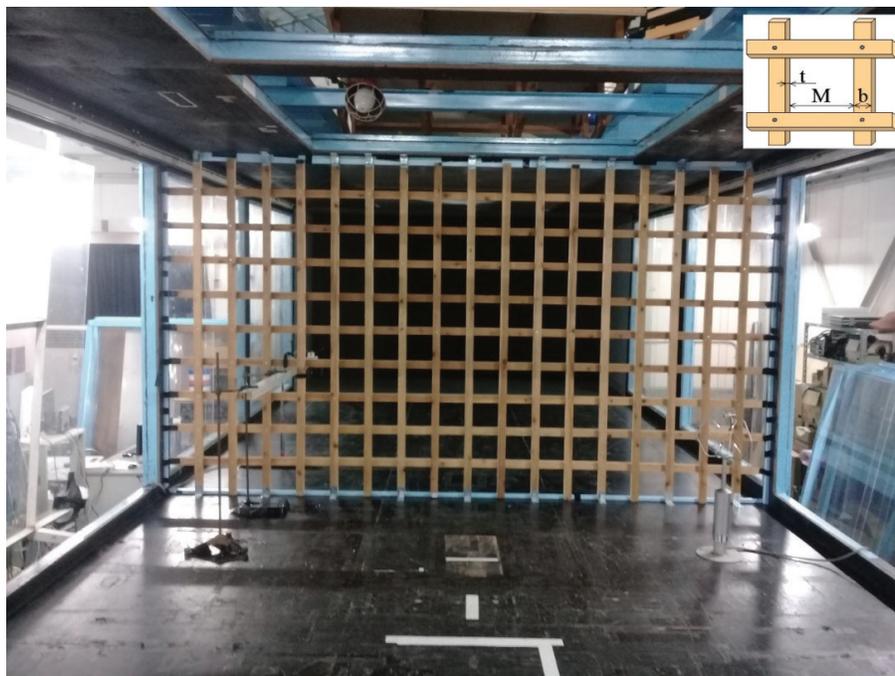


Figura 2. Cuadrícula de turbulencia.

La velocidad del viento fue medida con un anemómetro de hilo caliente manufacturado por Kanomax Japan Inc., Modelo 0251R-T5. Consiste en un filamento de Tungsteno de 5 μm de diámetro. Cada punto fue medido por 60 s, con una frecuencia de muestreo de 1 kHz con un filtro pasa bajas de 200 Hz. Más detalles de estos parámetros, calibración de equipo y especificaciones están disponibles en [5].

Montaje experimental

La cuadrícula de turbulencia se colocó en el marco entre los paneles 2 y 3 del túnel. Cuatro secciones transversales fueron determinadas, localizadas a 0.5 m, 0.93 m, 1.32 m y 3.1 m desde la cuadrícula. Las secciones de medición no están equidistantes debido a que la turbulencia no varía linealmente dentro del túnel [26].

Cinco puntos de medición del viento fueron simultáneamente montados en cada sección transversal, como se puede observar en la figura 3. Cuatro de los cinco puntos están separados 0.5 m del eje del túnel (su centro), localizados arriba, abajo y a ambos lados de él, mientras que el quinto punto se encuentra en lo que sería el eje de la turbina. Estos puntos fueron identificados como “Center, Up, Left, Down y Right” (sus nombres en inglés), donde su nombre corresponde a su ubicación relativa al eje del túnel. Es importante mencionar que la Figura 3 muestra una turbina en el túnel, pero esta está para fines ilustrativos solamente, las pruebas se realizaron en un túnel sin turbina, solo contaba con la cuadrícula para generar la turbulencia. También, en la figura 3 el túnel se observa como cuadrado, pero el utilizado es un túnel rectangular.

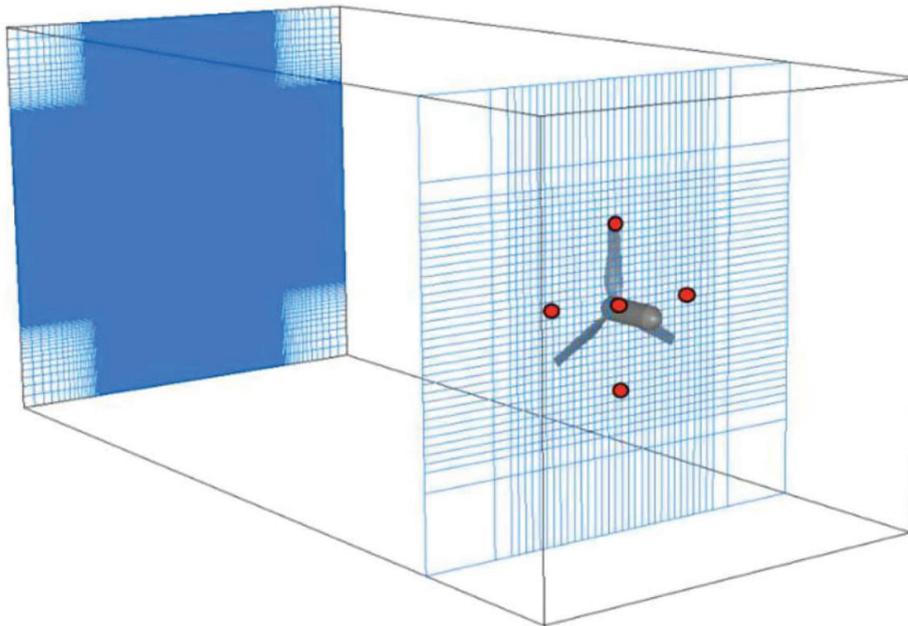


Figura 3. Puntos de medición en cada sección transversal.

La TI es calculada como la desviación estándar muestral dividida por el promedio de las mediciones tomadas en un periodo de prueba [27], donde un periodo corresponde a 60 s. Luego, este número es multiplicado por 100 para expresarlo como un porcentaje. Esta fórmula se observa en la ecuación 1.

$$TI = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n - 1}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i} \quad (1)$$

Aquí, v_i representa la velocidad en cada medición, \bar{v} es el promedio de las mediciones y n es la cantidad total de datos recolectados cada 60 s. Finalmente, en el caso en que alguna de las mediciones relacionadas con los puntos no se adhiera a la tendencia que muestren los otros, un análisis más profundo será realizado de la velocidad y la TI del punto atípico.

Resultados

Velocidad del viento

Midiendo solamente la velocidad del viento en cada uno de los puntos, se genera la figura 4.

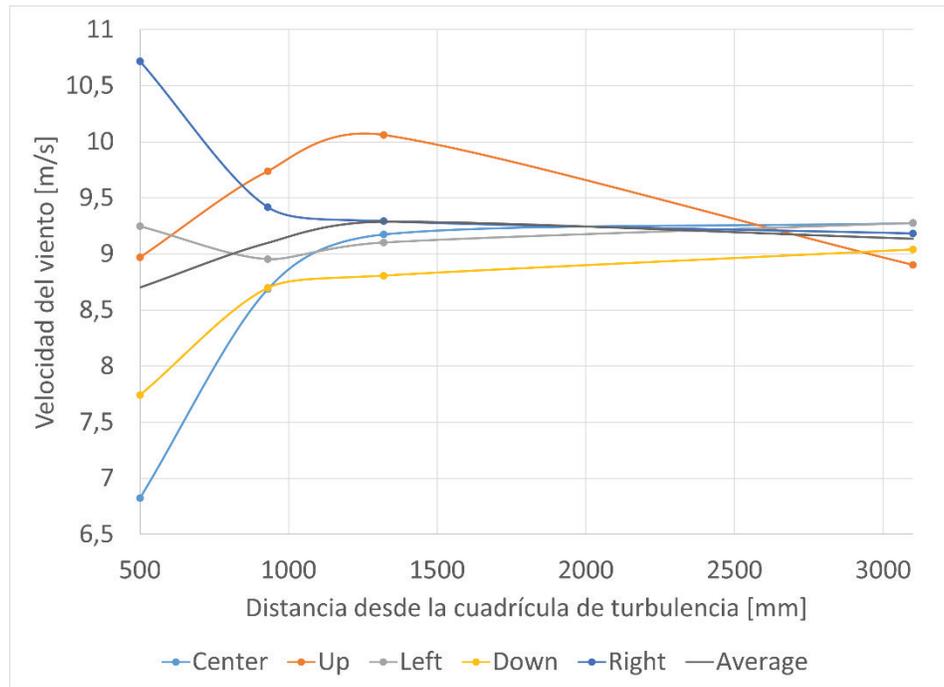


Figura 4. Velocidad del viento promedio en cada uno de los puntos de medición.

La tendencia de la velocidad del viento es estabilizarse a un valor alrededor de 9 m/s. Los puntos más cercanos a la cuadrícula muestran la diferencia más grande en velocidades, lo cual sucede debido a la cuadrícula alterando el flujo (en las especificaciones del túnel, su TI regular es menor a 0.5 %, de acuerdo con la figura 1) causando anisotropía en la velocidad que es evidente en el área transversal. Conforme aumenta la distancia desde el eje, disipación viscosa y transferencia de momento permiten resultados más similares en el área barrida del rotor. Esta disminución en velocidades no sucede para el punto Up (arriba del eje), lo cual es investigado más a fondo luego.

Intensidad de turbulencia

En la figura 5 se presentan los resultados sobre intensidad de turbulencia en cada punto luego de haberse aplicado la fórmula (1).

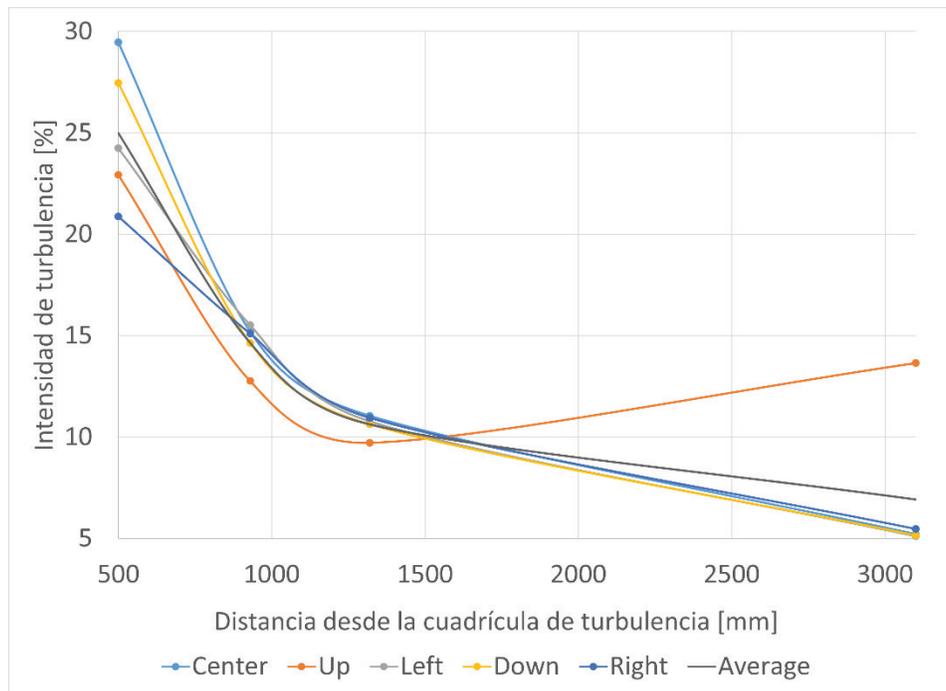


Figura 5. Intensidad de turbulencia en cada uno de los puntos de medición.

Justo como sucedió con la velocidad del viento, la TI tiende a decrecer a mayores distancias de la cuadrícula de madera. No obstante, a diferencia de las velocidades de la figura 4 que mostraban valores altos a 1.32 m de la cuadrícula y luego empezaban a converger a valores de alrededor de 9.25 m/s; el comportamiento de la TI tiende a decrecer claramente. Esto sucede debido a la manera en la que se calcula la intensidad de turbulencia. Como la TI se calcula usando la desviación estándar de la velocidad alrededor de un punto, alta TI se puede obtener cuando el viento es, en promedio, más lento pero su desviación estándar en ese punto es mayor. Como se puede esperar, hay una variación alta de la velocidad instantánea cerca de la cuadrícula y, como se mencionó antes, esta mayor variabilidad da camino a que haya un flujo más estable conforme aumenta la distancia desde la cuadrícula.

No obstante, en la figura 5 el punto “Up” presenta un comportamiento completamente distinto al que presentan los otros cinco en la sección transversal de 3.1 m. A continuación, un análisis más profundo se realizará sobre el punto “Up” en específico.

El caso del punto “Up”

Ambas las figuras 4 y 5 muestran como el punto Up difiere en el comportamiento de su velocidad y TI respectivamente al resto de los puntos. En la figura 4, su velocidad no converge de la misma manera a como lo hacen los otros. En la figura 5, hay un claro aumento en la TI del punto “Up” comparado a la disminución en los otros.

Para comprender ambos fenómenos, es importante primero recordar las dimensiones del túnel discutidas en la sección de Equipo. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que el túnel no está completamente cerrado para evitar el efecto de bloqueo. En específico, es necesario considerar que el punto “Up” está tan solo medio metro debajo del exterior del túnel. Esto es

algo que no sucede en los otros puntos, el punto a la izquierda y derecha del eje se encuentran a 1.3 m del exterior mientras que el punto inferior está a medio metro del piso. Esto significa que el punto “Up” es el que se encuentra más cerca de las secciones abiertas del túnel.

Si bien este es un túnel de circuito cerrado, al tener una sección parcialmente abierta algo del flujo puede salir del túnel temporalmente a través del panel removido en la sección 3 y luego ser succionado de nuevo en la sección 5 (ver figura 1), uniéndose al flujo dentro del túnel. Esta particularidad sucede principalmente debido a que el aire tiende a evitar obstáculos en su camino, por ejemplo, los instrumentos de medición.

Como el punto “Up” es el más cercano al exterior, el flujo dirigido hacia afuera es registrado por el anemómetro, lo cual explica por qué la velocidad es mayor que en el resto de los puntos en la figura 4.

El comportamiento de la TI es más complejo y necesita un mayor análisis, por esto se realizó una nueva serie de mediciones alrededor del punto “Up” con una variación vertical. Los resultados de estas mediciones se presentan en la figura 6.

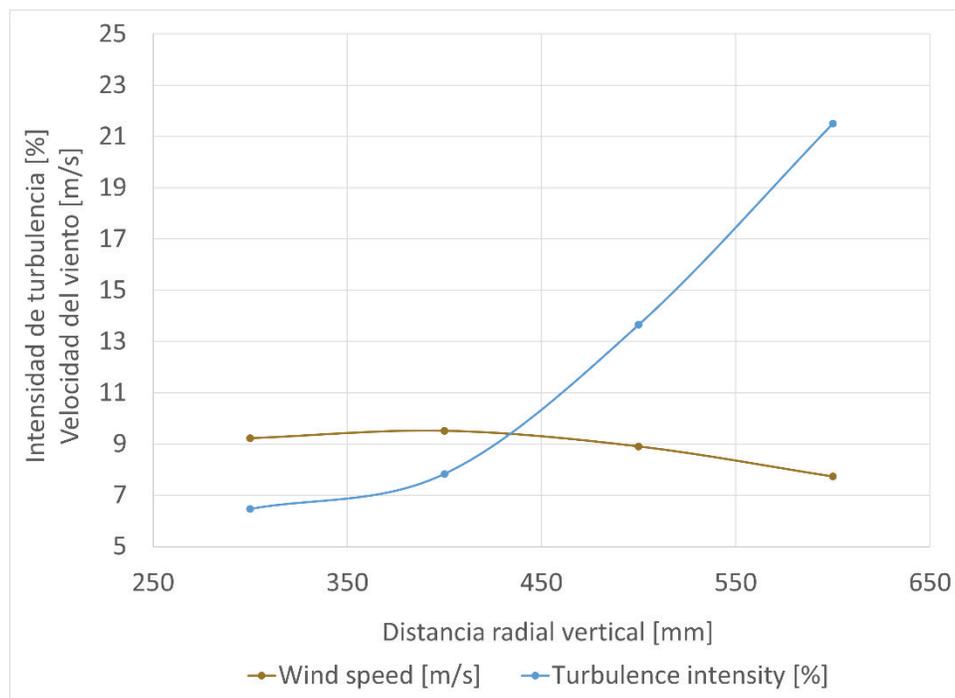


Figura 6. TI y velocidad del viento en el punto “Up” en la sección transversal localizada a 3.1 m de la cuadrícula.

Como se puede observar, los nuevos puntos de medición fueron colocados a 300 mm, 400 mm, 500 mm y 600 mm desde el eje del túnel. En la figura 6 la velocidad tiende a disminuir conforme la distancia vertical aumenta. Eventualmente, la distancia fuera del túnel sería de 0 m/s.

La TI aumenta considerablemente a lo largo de la componente vertical, lo cual sugiere que la combinación de las vigas en el techo del túnel (ver figura 2), con el aire entrante ocasionado por la sección semi abierta, afectan la variabilidad en la velocidad del viento. Al suceder esto, se pierde la consistencia con los otros 4 puntos principales.

Si el punto “Up” se colocara a 0.4 m por encima del eje de la turbina en vez de 0.5 m en la sección transversal de 3.1 m, las mediciones realizadas coincidirían más con las tomadas en los otros puntos. Esta pequeña disminución de 10 cm entre puntos de medición se traduce a

un significativo cambio en la TI. Esto apoya la idea de que estudios que lidian con fluctuaciones en la velocidad deben ser realizados bajo situaciones muy controladas para poder conocer las verdaderas condiciones del viento [20].

Es importante considerar que la dirección del viento cambia hacia el exterior del túnel. Como los anemómetros solo pueden medir la velocidad a lo largo de la dirección del túnel, este cambio de dirección genera mediciones erráticas. Esto conlleva a la ilusión de una TI aún mayor.

Con todo lo anterior en mente, esta nueva sección analiza la desviación entre el promedio de las mediciones y los datos tomados en solamente el eje del túnel.

Comparación entre la velocidad promedio y la velocidad en el eje del túnel

En la introducción se mencionó que muchos estudios dentro de túneles de viento, así como estudios de campo toman en cuenta solamente un punto de medición para la velocidad y TI: el eje de la turbina. Esto lo hacen para determinar la velocidad y TI a la que está sujeta la turbina en sí.

Dados los resultados anteriores, parece relevante que un pequeño cambio en los puntos de medición puede causar una gran variación en la intensidad de turbulencia. El cuadro 1 muestra el porcentaje de error entre las mediciones tomadas en el eje de la turbina (considerado como el valor teórico) en contra de el promedio de las mediciones en los 5 puntos experimentales (considerado como experimental). En la sección transversal de 3.1 m se utilizó el punto “Up” a 0.4 m sobre el eje de la turbina para evitar alterar los promedios (dada la explicación anterior).

Cuadro 1. Porcentajes de error para la intensidad de turbulencia.

Distancia desde la cuadrícula (m)	TI medida en el eje del túnel (%)	TI promedio en el área barrida por el rotor (%)	Porcentaje de error (%)
0.5	29.49	25.00	15.2
0.93	15.19	14.65	3.6
1.32	11.05	10.63	3.8
3.1	5.21	5.76	-10.5

Los porcentajes de error en el cuadro 1 muestran que la TI en el eje de la turbina puede variar considerablemente, hasta 15.2 % de acuerdo con los datos estudiados del valor promedio de TI en el área barrida por el rotor. También, los promedios aquí calculados se basan en solamente cinco puntos experimentales, por lo tanto, una malla más robusta de puntos en el área barrida podrá brindar resultados más exactos sobre la TI para estudiar a más profundidad las diferencias.

Conclusiones y recomendaciones

En este estudio, una cuadrícula de turbulencia fue usada para analizar la velocidad del viento y la intensidad de turbulencia a lo largo de diferentes secciones transversales de un túnel, tomando en cuenta el área barrida por el rotor de una turbina eólica.

Al examinar la velocidad del viento, diferencias importantes en los valores medidos en los cinco puntos en el área barrida fueron encontradas en regiones de alta turbulencia cerca de la cuadrícula, pero existe una convergencia de velocidades en las secciones transversales más alejadas de la cuadrícula lo cual llevó a una reducida TI.

Investigando la TI obtenida, se encontró que esta sigue lo establecido por la literatura, la TI no tiene un comportamiento lineal decreciente conforme se aleja de la cuadrícula.

Adicionalmente, se demostró que el porcentaje de error puede alcanzar hasta 15.2 % si la TI se considera solamente en el eje de la turbina, en vez de obtener el promedio de esta en toda el área barrida.

También, el valor de TI puede cambiar rápidamente en cortas distancias, especialmente en regiones cercanas al exterior del túnel de viento.

La principal conclusión de esta investigación es que para describir adecuadamente el flujo que incide sobre las turbinas eólicas, es necesario tomar en cuenta el promedio de las mediciones dentro del área barrida por el rotor de la turbina y no limitarlas a medir exclusivamente sobre el eje de la turbina.

Como recomendación para trabajo futuro, es necesario medir el efecto sobre el coeficiente de potencia cuando la velocidad del viento y la TI se registran en el eje de la turbina en comparación con cuando se toma en cuenta el promedio sobre el área barrida.

Contribución de los autores

Los autores declaran un porcentaje de contribución al presente artículo de la siguiente forma: Gustavo Richmond Navarro 80%; Carlos Arias Arguedas 10% y Pedro Casanova Treto 10%.

Referencias

- [1] S. Mertens, *Wind energy in the built environment: concentrator effects on buildings*, Brentwood, United Kingdom: Technische Universiteit Delf, 2006.
- [2] D. Kim, Y. Kim and B. Kim, "Changes in wind turbine power characteristics and annual energy production due to atmospheric stability, turbulence intensity, and wind shear," *Energy*, vol. 214, p. 119051, 2021.
- [3] 61400-12-1, IEC, *Wind turbines - Part 12-2: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, 2005.
- [4] L. C. Pagnini, M. Burlando and M. P. Repetto, "Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 112-121, 2015.
- [5] G. Richmond-Navarro, P. Casanova-Treto and F. Hernández-Castro, "Efecto de un difusor tipo wind lens en un flujo turbulento," *Uniciencia*, vol. 35, no. 2, pp. 1-18, 2021a.
- [6] Q. Li, Y. Kamada, T. Maeda, J. Murata, N. Yusuke and e. al., "Effect of turbulence on power performance of a horizontal axis wind turbine in yawed and no-yawed flow conditions," *Energy*, vol. 109, pp. 703-711, 2016a.
- [7] T. Rogers and S. Omer, "Yaw analysis of a micro-scale horizontal axis wind turbine operating in turbulent wind conditions," *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 58-63, 2013.
- [8] B. Kosasih and H. S. Hudin, "Influence of inflow TI on the performance of bare and diffuser-augmented micro wind turbine model," *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 154-167, 2016.
- [9] L. Clements and A. Chowdhury, "Performance evaluation of wind lens in turbulent environment," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 777-782, 2019.
- [10] S. Wang, Y. Zhou, M. M. Alam and H. Yang, "Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers," *Physics of Fluids*, vol. 26, no. 11, p. 115107, 2014.
- [11] M. Tahani, T. Maeda, N. Babayan, S. Mehrnia, M. Shadmehri, Q. Li, R. Fahimi and M. Masdari, "Investigating the effect of geometrical parameters of an optimized wind turbine blade in turbulent flow," *Energy Conversion and Management*, vol. 153, pp. 71-82, 2017.
- [12] C. R. Chu and P. H. Chiang, "Turbulence effects on the wake," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 124, pp. 82-89, 2014.
- [13] W. D. Lubitz, "Impact of ambient turbulence of a small wind turbine," *Renewable Energy*, vol. 61, pp. 69-73, 2006.

- [14] C. Sicot, P. Devinant, T. Laverne, S. Loyer and J. Hureau, "Experimental study of the effect of turbulence on horizontal axis wind turbine aerodynamics," *Wind Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 361-370, 2006.
- [15] S. W. Li, W. Wang, J. P. Wang and J. C. Mi, "Effect of TI on airfoil flow: Numerical simulations and experimental measurements," *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, vol. 32, no. 8, pp. 1029-1038, 2011.
- [16] M. Lin and H. Sarlak, "A comparative study on the flow over an airfoil using transitional turbulence models," in *AIP conference proceedings*, 2011.
- [17] R. Soto, S. Bartholomay, M. Manolesos, C. Nayeri and P. C. O, "EArfoil Shaped Vortex Generators applied on a Research Wind Turbine," in *Schitech 2021 Forum*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [18] S. Hoseinzadeh, A. Bahrami, S. M. Mirhosseini, A. Sohami and S. Heyns, "A detailed experimental airfoil performance investigation using an equipped wind tunnel," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 72, p. 101717, 2020.
- [19] Q. Li, Y. Kamada, M. T. M. J and Y. Nishida, "Visualization of the flow field and aerodynamic force on a horizontal axis wind turbine in turbulent inflows," *Energy*, Vols. 1304-1315, p. 111, 2016b.
- [20] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajaya and V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1351-1371, 2016.
- [21] Y. Ohya, J. Miyasaki, U. Göltenbott and K. Watanabe, "Power augmentation of shrouded wind turbines in a multirotor system," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 5, p. 139, 2017.
- [22] U. Göltenbott, Ohya, Y, S. Yoshida and P. Jamieson, "Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 25-34, 2017.
- [23] K. Watanabe and Y. Ohya, "Multi-rotor systems using ducted wind turbines for power output increase (Multi lens turbine)," *AIAA Scitech Forum*, vol. 141, no. 5, 2019.
- [24] Y. Ohya and T. Karasudani, "A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology," *Energies*, vol. 3, no. 4, pp. 634-649, 2010.
- [25] Y. Ohya and K. Watanabe, "A new approach toward power output enhancement using multirotor systems with shrouded wind turbines," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 141, no. 5, 2019.
- [26] A. Al-Abadi, J. Seok, M. Härtl, Ö. Ertunc and A. Delgado, "Experimental Investigations of the Turbulence Impact on the," in *10th EAWC PhD Seminar on Wind Energy in Europe*, Orleans, 2014.
- [27] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [28] Q. Li, J. Murata, M. Endo, T. Maeda and C. Kamada, "Experimental and numerical investigation on the effect of turbulent inflows on a horizontal axis wind turbine (part II: Wake characteristics)," *Energy*, vol. 113, pp. 1304-1315, 2016c.
- [29] G. Richmond-Navarro, T. Uchida and W. R. Calderón-Muñoz, "Shrouded wind turbine performance in yawed turbulent," *Wind Engineering*, p. 0309524X211036041, 2021b.

Artículo de revisión. Ácido úsnico: alternativa potencial contra la resistencia bacteriana actual

Review article. Usnic acid: potential alternative against current bacterial resistance

Sharon Juliet Avila-Zamora¹, Yessica Dayana
Pinzon-Perez², Jovanna Acero-Godoy³

Fecha de recepción: 13 de abril, 2022
Fecha de aprobación: 2 de septiembre, 2022

Avila-Zamora, S.J; Pinzon-Perez, Y.D; Acero-Godoy, J. Artículo de revisión. Ácido úsnico: alternativa potencial contra la resistencia bacteriana actual. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 3. Julio-Setiembre, 2023. Pág. 145-157.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6183>

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

 <https://orcid.org/0000-0002-4345-3793>

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

 <https://orcid.org/0000-0002-0385-8008>

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

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

Palabras clave

Actividad antimicrobiana; simbiosis; líquen; rutas metabólicas.

Resumen

El ácido úsnico (AU) es una sustancia líquénica, que hace parte de los metabolitos secundarios de los líquenes, los cuales son organismos que generan una simbiosis entre un organismo fotosintético y un micobionte, como ejemplo *Usnea sp*, producidos por diferentes rutas metabólicas, como es el caso del AU sustancia resultante de la vía del acetato-malonato. Por otro lado, la extracción de AU se realiza por medio de solventes orgánicos, maceración y para su identificación se realiza cromatografía líquida de alta eficiencia (HPCL). Las sustancias líquénicas cuentan con características antimicóticas, antivirales, citotóxicas, antimicrobianas, esta última ha sido estudiada contra bacterias patógenas como *Staphylococcus sp.*, *Escherichia coli*, *Streptococcus sp.*, entre otros, por considerarse de prevalencia hospitalaria, debido a que han desarrollado resistencia contra los antibióticos comúnmente usados, generando preocupación; por lo que se buscan nuevas alternativas que permitan seguir combatiendo a estos patógenos, se han investigado los mecanismos de acción utilizados por el AU, entre los que se encuentra, la capacidad de inhibir la síntesis de primers bacterianos evitando su replicación, en la literatura ya se ha confirmado su uso a nivel in vitro contra bacterias multirresistentes como en *Staphylococcus aureus* MRSA demostrando que el AU presenta una concentración mínima inhibitoria (MIC) de 25–50 µg/mL [1]. El mecanismo de inhibición del AU puede generar detención del crecimiento bacteriano; por medio de mecanismos como inhibición de la replicación (ADN-ARN) además de la inhibición genes de resistencia bacteriana blindando así este posible antibiótico frente a cepas bacterianas resistentes encontradas actualmente.

Keywords

Antimicrobial activity; symbiosis; lichen; metabolic pathways.

Abstract

Usnic acid (AU) is a lichen substance, which is part of the secondary metabolites of lichens, which are organisms that generate a symbiosis between a photosynthetic organism and a mycobiont, such as *Usnea sp*, produced by different metabolic pathways, such as this is the case of the AU substance resulting from the acetate-malonate pathway. On the other hand, the extraction of UA is carried out by means of organic solvents, maceration and for its identification, high efficiency liquid chromatography (HPCL) is carried out. Lichen substances have antimycotic, antiviral, cytotoxic, and antimicrobial characteristics, the latter has been studied against pathogenic bacteria such as *Staphylococcus sp.*, *Escherichia coli*, *Streptococcus sp.*, among others, due to antiquity of hospital prevalence, due to the fact that they have developed resistance against used antibiotics, concern; Therefore, new alternatives are being sought that allow us to continue fighting these pathogens. The mechanisms of action used by UA have been investigated, among which are the ability to inhibit the synthesis of bacterial primers, preventing their replication. has confirmed its in vitro use against multiresistant bacteria such as *Staphylococcus aureus* MRSA, showing that UA has a minimum inhibitory concentration (MIC) of 25–50 µg/mL [1]. The UA inhibition mechanism can lead to bacterial growth arrest; through mechanisms such as replication inhibition (DNA-RNA) in addition to the inhibition of bacterial resistance genes, thus shielding this possible antibiotic against resistant bacterial strains currently found.

Introducción

Los líquenes son organismos compuestos que se pueden localizar en diferentes partes del mundo, se estima que existe un promedio de 15.000 especies siendo el 8% de la cobertura vegetal de la tierra, podemos encontrar 820 especies de género de *Xanthoparmelia*, 500 de *Cladonia*, 350 de *Usnea*, 10 de *Evernia* [2]. Los líquenes tiene la capacidad de producir compuestos activos como producto de su metabolismo, estos géneros de líquenes son de importancia por sus características y uso como: antimicóticos, antivirales, antiinflamatorios, analgésicos, antipiréticos, antiproliferativos, citotóxicos, antimicrobianos, siendo esta última reportada desde 1944 [3], [4]. Los líquenes han sido utilizados desde tiempos inmemorables por diferentes culturas como fuente de alimento y medicinas, sin embargo, durante varios años no lograron ser estudiados debido a que por sus características son difícil de cultivar en condiciones de laboratorio, limitando así el aislamiento y determinación de actividades de estos metabolitos, gracias al avance tecnológico hoy se puede identificar y aislar algunos metabolitos como es el caso de AU, el cual es el metabolito líquénico más estudiado caracterizado por su capacidad antibacteriana [5]–[7].

El uso de antibióticos se ha implementado desde los años 1900, con el fin de eliminar o inhibir el crecimiento de las bacterias que afectan la salud, sin embargo, el uso inadecuado o disposición inapropiada de los antibióticos es una de las principales razones para que las bacterias adquieren resistencia, que se puede dar la por la transferencia horizontal de genes, modificación de los sitios objetivo, bombas de eflujo (efflux), producción de enzimas, entre otros; además la mitad de los antibióticos administrados a los seres humanos y los animales se excreta en forma activa sin cambios principalmente a través de la orina y heces fecales llegando a acumularse en todas las matrices ambientales, principalmente agua y suelos [8], [9]. Por ello es necesario implementar sustancias antimicrobianas que provengan de productos naturales, como el AU, que proporcionen nuevos mecanismo de acción contra las bacterias para así combatir la actual problemática de resistencia bacteriana que ha aumentado drásticamente con el paso de los años.

Estructura de los líquenes

Los líquenes son una asociación entre un hongo heterótrofo (micobionte) y un microorganismo fotosintético (fotobionte), esta simbiosis fue descrita por el botánico y liquenólogo suizo Simon Schwendener en 1869 [10], el fotobionte que conforma los líquenes se encuentran formado en el 90% de los casos por algas y en un 10% por cianobacterias, en el caso de las algas está encargado de proporcionar carbohidratos a los hongos, posteriormente, para almacenarlo el micobionte lo transforma en manitol, por la vía de pentosa fosfato, en cambio, las cianobacterias son las responsables de la fijación del nitrógeno y del carbono, participando activamente en el proceso de la fotosíntesis. [11]

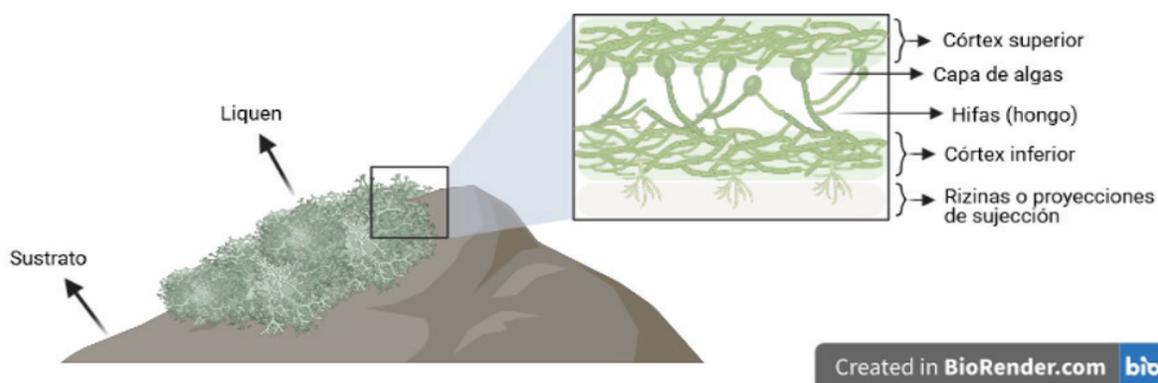


Figura 1. Estructura del talo liquénico.

Los líquenes tienen un aparato vegetativo, también conocido como talo, compuesto por el córtex superior, capa de algas, médula (hifas) y córtex inferior (Figura 1). La médula es hidrófoba, por lo que permite la circulación del aire, dentro de la misma. El talo se puede clasificar según su organización en heterómeros, cuando observan cada una de las capas que lo componen; y homómeros, cuando se encuentran distribuidos de manera uniforme, estos cuentan con la capacidad de absorber más agua y favorecer la fijación del nitrógeno [12]. Por otra parte, los líquenes pueden clasificarse de acuerdo a su forma de crecimiento; la forma foliácea cuenta con cada una de las capas de los líquenes, adicionalmente, tiene rizinas que ayudan en su unión con el sustrato; la crustácea, cuando carece del córtex inferior, por lo que la médula es la que se encuentra en contacto con el sustrato; fruticuloso tiene un solo punto de unión con el sustrato, tienen varias ramificaciones, por lo que pueden ser colgantes o verticales [13].

Para la identificación del género y especie de los líquenes se emplean claves dicotómicas en las que se tienen en cuenta características como el color superficial que presenta el lichen, el tipo de crecimiento que presenta el talo, color de la base, el tipo de ramificaciones, el color de las ramificaciones, el tipo de rizinas, entre otras [14]. Otra parte fundamental que componen los líquenes son los sustratos, que ofrecen como función principal soporte y en algunos casos aportan nutrientes, los sustratos más comunes incluyen rocas, árboles, madera, suelo, exoesqueleto de algunos invertebrados, caparazones de tortugas, entre otros [15]. Las rizinas son un componente fundamental en los líquenes foliáceos que sirven para la fijación al sustrato, pueden ser constituido de hifas prosoplectenquimatosas, integrada por hifas paralelas y radiadas [13].

Ácido úsnico (AU)

El AU (2,6-diacetil-7,9-dihidroxi-8,9b-dimetil-1,3 (2H, 9bH)-dibenzofurandiona) se presenta en dos formas enantioméricas dependiendo de la posición del grupo metilo en el átomo quiral 9b, estas formas se pueden presentar de manera única en una especie liquénica o en algunos casos en ambas formas, esta característica ha revelado diferencias en su actividad biológica y farmacológica, sin embargo en los estudios realizados usualmente no se suele comparar, especificar o caracterizar el enantiómero utilizado, lo cual reduce la información de sus diferencias más específicas; de aquí que algunas características como la propiedad antibiofilm suelen asociarse a (+) - AU, puesto que es el más estudiado, por otra parte podemos ver diferencias entre su actividad antibacteriana como, en donde 6 de las 7 cepas usadas se vio mayor actividad en (+) - AU por el contrario la última cepa presentó el mismo CMI para ambos enantiómeros [16], [17].

El AU ha sido objeto de varios análisis siendo observado como: parte del extracto de líquenes, como compuesto aislado y sus derivados apuntando en varias ocasiones su capacidad de actividad antimicrobiana contra hongos, parásitos y bacterias. En el caso de las bacterias este ha sido probado contra varias especies como se puede observar en la tabla 1 evidenciado su efecto antibacterial en distintas concentraciones, además, en otros estudios ha demostrado su gran efectividad contra biopelículas. Sin embargo, frente a las múltiples utilidades de AU se encuentra la hepatotoxicidad causada por este durante su administración prolongada y su baja solubilidad en agua delimitando su biodisponibilidad, a causa de esto actualmente el uso de AU se reduce a fármacos tópicos por consiguiente se han evaluado otras formas de aplicación de este metabolito para ser usado en la clínica por medio de derivaciones de AU o emplear nano y microportadores basados en lípidos, poliméricos y no orgánicos, no obstante la evaluación antimicrobiana de estos solo ha sido probada in vitro sin resultados concluyentes debido a variaciones experimentales; se realizó un estudio in vivo en ratones aplicando distintas cantidades de AU, demostrando buena tolerancia sin daño hasta 100 µg/kg en ratones infectados [1], [18], [19].

Ruta metabólica para la formación del AU

Los líquenes producen metabolitos primarios (intracelulares) que incluyen proteínas, aminoácidos, carotenoides, polisacáridos y vitaminas [13] y secundarios (extracelulares), también denominados sustancias líquénicas, de las que se conocen alrededor de 1000 tipos producidas en mayor medida en la médula del líquen, por lo que su origen es fúngico [20], se pueden encontrar en forma de cristales.

Los metabolitos secundarios se producen como respuesta a diferentes factores ambientales: la temperatura, la exposición a luz o radiación ultravioleta; o factores bióticos: competencia con otras plantas, depredación por insectos, mamíferos y demás microorganismos de los que sean fuente de alimentación [20], [21], además, estos metabolitos secundarios le pueden dar características a los líquenes por ejemplo el olor, color y sabor; se conocen tres rutas metabólicas, consideradas las más importantes: la vía del acetato-malonato, del ácido mevalónico y del ácido shikímico [22].

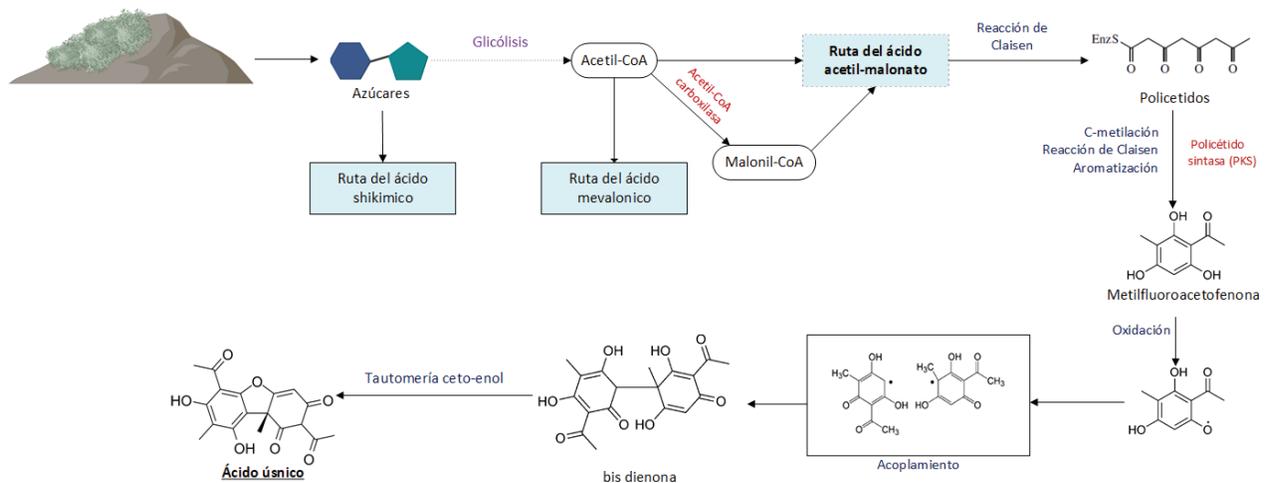


Figura 2. Ruta metabólica del AU.

El AU, es un dibenzofurano que se produce por medio de la vía del acetato-malonato, es la ruta de la que se obtienen una mayor cantidad de metabolitos secundarios y es utilizada por los líquenes cuando su fotobionte está compuesto por algas, se considera parte de la respuesta utilizada por los líquenes al exponerse al estrés oxidativo [4], [23]. La ruta metabólica del acetato-malonato inicia con la obtención de policétidos, por medio de la descarboxilación del malonil CoA y posterior polimerización del acetilo y propionilo, con los policétidos obtenidos se lleva a cabo la reacción de Claisen, metilación y aromatización produciendo metilfluoroacetofenona, que tras el acoplamiento homólogo de dos unidades del mismo, da paso al compuesto bis dienona, que tras su tautomería ceto-enol, equilibrio ceto-enólico, forma el AU [21], [24].

Métodos de extracción e identificación de las sustancias líquénicas

Para estudiar las sustancias líquénicas, se debe hacer un aislamiento de las mismas, para ello se pueden emplear diferentes métodos de extracción y solventes orgánicos, ya que según la especie del líquen se obtendrán diferentes sustancias líquénicas, los principales disolventes que se utilizan son la acetona (C_3H_6O), el etanol (C_2H_5OH) y el metanol (CH_3OH) [25], [6], para ello se toma el líquen, en especial el talo, que es la parte en la que se encuentra una mayor cantidad de la sustancia, representando alrededor del 10% del peso del talo seco [20]. Las sustancias líquénicas denominadas extractos metanólicos, siendo el metanol el solvente utilizado para su extracción, hacen parte de los dépsidos, depsidonas y dibenzofuranos [26].

El procedimiento de extracción inicia con la maceración del líquen, para este proceso es necesario el uso de disolventes, en algunos casos se puede utilizar equipos para la extracción de la sustancia, como lo son el extractor Soxhlet o el rotavapor, los extractos se pueden conservar al disolverse en una pequeña cantidad de dimetilsulfóxido (DMSO) y almacenarlos a 4°C [27]. Para la determinación de las sustancias líquénicas, se utiliza la técnica de cromatografía líquida de alta eficiencia (HPCL), con detectores de espectrofotometría de masas (MS) o ultravioleta (UV), por medio de esta técnica se ha determinado que la especie de *Evernia prunastri* presenta en mayor cantidad la sustancia líquénica denominada como ácido evernico [28], en *Evernia mesomorpha* se ha identificado el ácido divaricático y AU, esta última es la principal sustancia que se encuentre en el género de *Usnea spp*, en la corteza [29].

Técnicas para el estudio de la actividad antimicrobiana

Por medio del método de difusión en disco o microdilución se evalúa la actividad antimicrobiana de las sustancias líquénicas, por ello se utilizan cultivos bacterianos con una concentración de entre 10^5 - 10^8 UFC / mL (unidades formadoras de colonia), equivalente a 0,5 en la escala de McFarland .

En el caso del método de difusión en disco, el agar que se emplea es Mueller Hinton (MH), se utilizan sensidiscos entre 6mm [30] a 8mm [29], como control negativo se puede utilizar la vancomicina, gentamicina, tetraciclina [31] y el dimetilsulfóxido (DMSO) como control positivo; los sensidiscos se impregnan con las sustancias líquénicas, también se puede perforar el agar y depositar el extracto. El resultado se determina por el diámetro del halo de inhibición [32]. Por otro lado, en el ensayo de microdilución, se diluyen las bacterias sembradas en caldo LB (Luria Bertani) para lograr una concentración de 10^6 UFC, y concentraciones de entre 0,1 a 500 $\mu\text{g/mL}$ distribuidas en la placa que cuenta con 90 pocillos, se incuban a 37°C, con el fin de determinar la concentración mínima inhibitoria (CMI), en $\mu\text{g/mL}$, por medio de la turbidez de los pocillos [33].

Mecanismos de acción y actividad antimicrobiana del AU

El AU tiene la capacidad de inhibir la síntesis de ADN y ARN de las bacterias, su mecanismo de acción, consiste en su unión con la enzima primasa (DnaG), encargada de la síntesis de las hebras cortas de ARN o también conocidas como primers, necesarias para la replicación del ADN bacteriano, esta enzima es de importancia en la farmacología por presentar un sitio activo para la unión de nucleótidos y un módulo de unión al ADN [34], [35].

También se ha descrito su capacidad de inhibir los genes *norA*, *norB*, *norC*, *mepA* y *mdeA* de las bombas de expulsión activa, eflujo o efflux [36], de la que se conocen las superfamilias: ABC (casete de unión al ATP), MFS (superfamilia del facilitador mayor), SMR (resistencia pequeña a multifarmacos), MATE (extrusión de multifarmacos y tóxicos), PACE (eflujo de compuestos antimicrobianos proteobacterianos) y RND (resistencia a división por nodulación) [37].

Se puede observar la actividad antimicrobiana del AU en el cuadro 1, teniendo en cuenta las diferentes especies de líquenes en los que se puede encontrar como metabolito secundario.

La acción antibiótica del AU ha sido señalada en varias ocasiones por su potencial contra bacterias gram positivas con resistencia antibiótica. El género *Staphylococcus sp.* se suele asociar a esta afirmación, por consiguiente dentro de esta revisión encontramos resultados como los de Moura et al [38] donde en concentraciones bajas de AU de 79.6 µg/mL incluyendo cepas con resistencia antimicrobiana y 250 µg/mL, en contraste con otros estudios donde esta concentración mínima inhibitoria se ve aumentada en cepas no formadoras de biofilm 25-50 µg/mL [1], 21 µg/mL en *S. aureus* [33], 12.5 µg/mL en *S. aureus* y *S. haemolyticus* [46], así mismo encontramos *S. epidermidis* con 3.12 µg/mL como MIC. Al comparar los resultados con los obtenidos por otras sustancias, como las sustancias líquénicas derivadas de las xantonas, dentro de las que encontramos la esterigmatocistina que suele presentar MIC superior a 100 µg/mL contra *S. aureus* (MRSA) [48], [49].

Respecto a *E. coli*, bacilos Gram negativos, se observan valores de MIC de 64 µg/mL y 225 µg/mL, obteniendo mejores resultados en las especies de *Usnea sp.* (*U. filipendula*, *U. fulvorenans* y *U. intermedia*) respecto a *Evernia prunastri*. Estos resultados pueden estar relacionados a la cantidad de AU, que se puede encontrar en cada especie y el solvente utilizado para su extracción, ya que del género *Usnea sp.* se logra aislar una mayor cantidad del AU, por otro lado, en *Evernia sp.* este se encuentra en menor cantidad, la sustancia líquénica que predomina es el ácido evérnico [33], [43].

Dentro de las bacterias gram positivas presentes en la literatura encontramos *Enterococcus sp.* con dos de sus especies más representativas a nivel clínico donde podemos observar resultados similares de MIC en cepas resistentes y susceptibles a antibióticos comúnmente usados, en el caso de *E. faecalis* obtuvieron un resultado de 9.4 µg/mL tanto en cepas susceptibles como resistentes, aunque en estas últimas se extiende hasta 18.8 µg/mL MIC, sin embargo, en un estudio más reciente el resultado de inhibición del AU aumentó a 50 µg/mL MIC para *E. faecalis*. Por otro lado, *E. faecium* en la cepa resistente presentó una concentración inferior a la susceptible con 4.7 µg/mL y 9.4 µg/mL según corresponde, se refleja un control de inhibición con ampicilina el cual demuestra mejores resultados a concentraciones de 2 µg/mL [40], [46].

Cuadro 1. Actividad antimicrobiana del AU.

Espece liquénica	Solvente orgánico	Microorganismo	Resultados	Ref.
<i>Cladonia rappii</i>	Acetona, etanol, cloroformo	<i>Helicobacter pylori</i>	0,012-0,026 µg/mL (MIC)	[17]
<i>Cladonia substellata</i> Vainio	Éter, cloroformo y acetona.	<i>Staphylococcus spp</i>	79.6 µg/mL (MIC) (MBC)	[38]
<i>Evernia prunastri</i>	ND	<i>Staphylococcus aureus</i>	21 µg/mL (MIC)	[33]
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	133 µg/mL (MIC)	
		<i>Escherichia coli</i>	225 µg/mL (MIC)	
	Hexano, éter etílico, cloroformo, acetato de etilo, metanol y agua	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	16 µg/mL (MIC)	[39]
El (+)- AU purificado y adquirido de Carl-Roth (Germany)	ND	<i>Enterococcus faecium</i>	9.4 µg/mL (MIC)	[40]
		<i>Enterococcus durans</i>	37.5 µg/mL (MIC)	
El AU purificado y adquirido de Sigma Aldrich, EE. UU.	ND	<i>Streptococcus mutans</i>	5 µg/mL (MIC) 10 µg/mL (MBC)	[41]
		<i>Streptococcus pyogenes</i>	16-18 mm (HI)	[42]
<i>Usnea filipendula</i> y <i>Usnea intermedia</i>	Metanol	<i>Escherichia coli</i> O157: H7	64 µg/mL (MIC)	[43]
<i>Usnea filipendula</i> , <i>Usnea fulvoreagens</i> y <i>Usnea intermedia</i>		<i>Escherichia coli</i> E245		
<i>Usnea sp.</i>	ND	<i>Propionibacterium acnes</i> ATCC 6919	20–32 mm (HI)	[44]
<i>Usnea sp.</i>	ND	<i>Vibrio harveyi</i>	23.8 mm (HI)	[45]
<i>Usnea steineri</i>		Acetona	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	3.12 µg/mL (MIC) 6.25 µg/mL (MBC)
	<i>Staphylococcus aureus</i>		12.5 µg/mL (MIC)	
	<i>Staphylococcus haemolyticus</i>			
	<i>Enterococcus faecalis</i>		50 µg/mL (MIC)	
	<i>Mycobacterium avium</i> (ATCC 15769)		16 µg/mL (MIC)	[47]
<i>Mycobacterium kansasii</i> (ATCC 12478)	8 µg/mL (MIC)			
<i>Mycobacterium tuberculosis</i> (ATCC 27294)				
<i>Usnea subfloridana</i>	Metanol	<i>Staphylococcus aureus</i> MRSA	25–50 µg/mL (MIC)	[1]

ND: No disponible. MIC: Concentración mínima inhibitoria. MBC: Concentración mínima bactericida. HI: Halo de inhibición

En el caso del género *Streptococcus sp.* se encuentra dos ensayos con (+)- ácido úsnico de referencia donde se evalúa *S. pyogenes* y *S. mutans*, este primero demostró un halo de 16-18 mm con 150 µg/mL en cambio en el segundo podemos observar un MIC de a partir de 5.0 µg/mL actuando como bactericida a partir de 10 µg/mL demostrando mayor efectividad en esta especie, por otro lado en ambos estudios se evaluó la reducción de biopelícula siendo efectivo en ambos casos ya que reduce los ácidos grasos y proteínas en las biopelículas dispersando la adherencia desde bajas concentraciones como 0.25 µg/mL en biopelículas en formación y 10 µg/mL en biopelículas maduras [41], [42].

El género *Mycobacterium sp.*, divide sus especies entre micobacterias tuberculosas y no tuberculosas (NTM), las primeras pueden causar tuberculosis, las segundas causan enfermedades oportunistas, en personas inmunosuprimidas, de avanzada edad e inmunocompetentes. Se ha descrito el hallazgo de micobacterias en fuentes de agua y suelo; en este caso se puede comparar la actividad antimicrobiana del AU encontrado en las especies liquénicas de *U. steineri* y *E. prunastri* frente a *M. tuberculosis*, con resultados de MIC de 8 µg/mL y 16 µg/mL, respectivamente. De manera análoga, se obtienen resultados del AU contra NTM, como *M. avium* de 16 µg/mL (MIC) frente al AU de *E. prunastri* y contra *M. kansasii* 8 µg/mL (MIC), con AU proveniente de *U. steineri* [39], [47], [50].

En contraste con lo anterior, encontramos diferentes grupos bacterianos que no han sido estudiados de tal manera que sea posible comparar la efectividad del AU en diferentes especies liquénicas, como es el caso del líquen *Cladonia rappii* frente a *Helicobacter pylori*, presentando mejores resultados con el AU, entre 0.012-0.026 µg/mL (MIC), frente al omeprazol 0.046-0.185 µg/mL (MIC). En el caso de *Vibrio harveyi*, no se observaron valores significativos respecto al control utilizado, con AU fue de 23.8 mm mientras que con cloranfenicol fueron 22.9 mm; similar a los resultados de *Propionibacterium acnes* 20–32 mm, el control clindamicina con 30 mm (HI) [17], [44], [45].

Conclusiones

Los líquenes son organismos compuestos capaces de producir metabolitos únicos que han demostrado utilidades a nivel médico, sin embargo, se ha visto limitado su uso a causa de falta de ensayos para la evaluación de riesgos y espectro en sus aplicaciones. El AU es un metabolito que actualmente cuentan con protocolos de determinación y extracción, se pueden llegar a convertir el AU en un producto industrial, con el cual contar para el avance de nuevas estrategias antibióticas que pueden combatir la actual resistencia bacteriana, igualmente disminuyendo el impacto ambiental causado con antibióticos regulares.

La acción antibacteriana se puede evidenciar en bajas concentraciones de AU con los géneros Gram positivos, además de afectar comúnmente su propiedad de formación de biofilm, así pues, dentro de los resultados podemos encontrar un promedio aproximado de 79.7 µg/mL como CMI encontrándose dentro del rango tolerable para su administración, de modo que es posible su uso como terapia antibiótica, a pesar de esto continúa siendo recomendable el uso de aplicaciones alternativas que mejoren su biodisponibilidad. En pocas palabras, el AU nos puede brindar una opción viable por su variedad de mecanismo de acción a los antibióticos tradicionales, son recomendables más estudios a nivel in vivo para la evaluación de una posible terapia antibacteriana con este metabolito.

Referencias

- [1] V. K. Gupta *et al.*, «Membrane-damaging potential of natural L-(–)-usnic acid in *Staphylococcus aureus*», *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.*, vol. 31, n.º 12, pp. 3375-3383, dic. 2012, doi: 10.1007/s10096-012-1706-7.
- [2] R. Lücking, B. P. Hodkinson, y S. D. Leavitt, «The 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota – Approaching one thousand genera», *The Bryologist*, vol. 119, n.º 4, Art. n.º 4, ene. 2017, doi: 10.1639/0007-2745-119.4.361.
- [3] M. Thakur y H. Chander, «Potential of Lichens: A Review of Bioactive Compounds with Biological Activities», p. 10, 2021.
- [4] S. Yousuf, M. I. Choudhary, y Atta-ur-Rahman, «Lichens», en *Studies in Natural Products Chemistry*, vol. 43, Elsevier, 2014, pp. 223-259. doi: 10.1016/B978-0-444-63430-6.00007-2.
- [5] W. A. Elkhateeb, G. M. Daba, D. Sheir, T.-D. Nguyen, K. K. Hapuarachchi, y P. W. Thomas, «Mysterious World of Lichens: Highlights on Their History, Applications, and Pharmaceutical Potentials», *Nat. Prod. J.*, vol. 10, ene. 2020, doi: 10.2174/2210315510666200128123237.
- [6] R. Sargsyan, A. Gasparyan, G. Tadevosyan, y H. Panosyan, «Antimicrobial and antioxidant potentials of non-cytotoxic extracts of corticolous lichens sampled in Armenia», *AMB Express*, vol. 11, n.º 1, p. 110, dic. 2021, doi: 10.1186/s13568-021-01271-z.
- [7] Devashree, A. Pandey, y A. Dikshit, «Lichens: Fungal symbionts and their secondary metabolites», en *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2021, pp. 107-115. doi: 10.1016/B978-0-12-821005-5.00007-7.
- [8] T. Khare *et al.*, «Exploring Phytochemicals for Combating Antibiotic Resistance in Microbial Pathogens», *Front. Pharmacol.*, vol. 12, p. 720726, jul. 2021, doi: 10.3389/fphar.2021.720726.
- [9] D. G. J. Larsson y C.-F. Flach, «Antibiotic resistance in the environment», *Nat. Rev. Microbiol.*, nov. 2021, doi: 10.1038/s41579-021-00649-x.
- [10] D. Armaleo *et al.*, «The lichen symbiosis re-viewed through the genomes of *Cladonia grayi* and its algal partner *Asterochloris glomerata*», *BMC Genomics*, vol. 20, n.º 1, Art. n.º 1, dic. 2019, doi: 10.1186/s12864-019-5629-x.
- [11] M. Grimm, M. Grube, U. Schiefelbein, D. Zühlke, J. Bernhardt, y K. Riedel, «The Lichens' Microbiota, Still a Mystery?», *Front. Microbiol.*, vol. 12, p. 623839, mar. 2021, doi: 10.3389/fmicb.2021.623839.
- [12] B. Büdel y C. Scheidegger, «Thallus morphology and anatomy», en *Lichen Biology*, 2.^a ed., T. H. Nash, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008, pp. 40-68. doi: 10.1017/CBO9780511790478.005.
- [13] B. Ranković y M. Kosanić, «Lichens as a Potential Source of Bioactive Secondary Metabolites», en *Lichen Secondary Metabolites*, B. Ranković, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1-29. doi: 10.1007/978-3-030-16814-8_1.
- [14] G. Amo de Paz, A. R. Burgaz, y Editorial Complutense, *Líquenes epifíticos del Hayedo de Montejo de la Sierra (Madrid)*. Madrid: Editorial Complutense, 2009. Accedido: 1 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://www.ucm.es/BUCM/editorialucm/36925.php>
- [15] D. I. V. Flores, «Los líquenes, una alternativa para el control de fitopatógenos», p. 8, 2014.

- [16] A. Galanty, P. Paško, y I. Podolak, «Enantioselective activity of usnic acid: a comprehensive review and future perspectives», *Phytochem. Rev.*, vol. 18, n.º 2, pp. 527-548, abr. 2019, doi: 10.1007/s11101-019-09605-3.
- [17] I. M. Walton, J. M. Cox, C. A. Benson, D. (Dan) G. Patel, Y.-S. Chen, y J. B. Benedict, «The role of atropisomers on the photo-reactivity and fatigue of diarylethene-based metal-organic frameworks», *New J. Chem.*, vol. 40, n.º 1, pp. 101-106, 2016, doi: 10.1039/C5NJ01718A.
- [18] I. Francolini, A. Piozzi, y G. Donelli, «Usnic Acid: Potential Role in Management of Wound Infections», en *Advances in Microbiology, Infectious Diseases and Public Health*, vol. 1214, G. Donelli, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 31-41. doi: 10.1007/5584_2018_260.
- [19] A. Zugic, V. Tadic, y S. Savic, «Nano- and Microcarriers as Drug Delivery Systems for Usnic Acid: Review of Literature», *Pharmaceutics*, vol. 12, n.º 2, p. 156, feb. 2020, doi: 10.3390/pharmaceutics12020156.
- [20] M. J. Calcott, D. F. Ackerley, A. Knight, R. A. Keyzers, y J. G. Owen, «Secondary metabolism in the lichen symbiosis», *Chem. Soc. Rev.*, vol. 47, n.º 5, Art. n.º 5, 2018, doi: 10.1039/C7CS00431A.
- [21] M. Goga, J. Elečko, M. Marcinčinová, D. Ručová, M. Bačkorová, y M. Bačkor, «Lichen Metabolites: An Overview of Some Secondary Metabolites and Their Biological Potential», en *Bioactive Molecules in Food*, J.-M. Mérillon y K. G. Ramawat, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1-36. doi: 10.1007/978-3-319-76887-8_57-1.
- [22] Devashree, A. Pandey, y A. Dikshit, «Lichens: Fungal symbionts and their secondary metabolites», en *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2021, pp. 107-115. doi: 10.1016/B978-0-12-821005-5.00007-7.
- [23] Y. Zhao, M. Wang, y B. Xu, «A comprehensive review on secondary metabolites and health-promoting effects of edible lichen», *J. Funct. Foods*, vol. 80, p. 104283, may 2021, doi: 10.1016/j.jff.2020.104283.
- [24] D. C. S. Macedo *et al.*, «Usnic acid: from an ancient lichen derivative to promising biological and nanotechnology applications», *Phytochem. Rev.*, vol. 20, n.º 3, pp. 609-630, jun. 2021, doi: 10.1007/s11101-020-09717-1.
- [25] S. Şahin, S. Oran, P. Şahintürk, C. Demir, y Ş. Öztürk, «Ramalina Lichens and Their Major Metabolites as Possible Natural Antioxidant and Antimicrobial Agents», *J. Food Biochem.*, vol. 39, n.º 4, pp. 471-477, ago. 2015, doi: 10.1111/jfbc.12142.
- [26] S. S. Charry, «IDENTIFICACION DE LOS METABOLITOS SECUNDARIOS DE LÍQUENES DEL GÉNERO *Sticta* PROCEDENTES DEL PÁRAMO DE ANAIME (ANAIME- TOLIMA)», p. 94, 2019.
- [27] P. S. A. I. Shiromi, R. P. Hewawasam, R. G. U. Jayalal, H. Rathnayake, W. M. D. G. B. Wijayarathne, y D. Wanniarachchi, «Chemical Composition and Antimicrobial Activity of Two Sri Lankan Lichens, *Parmotrema rampoddense*, and *Parmotrema tinctorum* against Methicillin-Sensitive and Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*», *Evid. Based Complement. Alternat. Med.*, vol. 2021, pp. 1-18, jun. 2021, doi: 10.1155/2021/9985325.
- [28] N. Aoussar *et al.*, «Phytochemical Analysis, Cytotoxic, Antioxidant, and Antibacterial Activities of Lichens», *Evid. Based Complement. Alternat. Med.*, vol. 2020, pp. 1-11, dic. 2020, doi: 10.1155/2020/8104538.

- [29] J. Oh, Y. Kim, H.-S. Gang, J. Han, H.-H. Ha, y H. Kim, «Antimicrobial Activity of Divaricatic Acid Isolated from the Lichen *Evernia mesomorpha* against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*», *Molecules*, vol. 23, n.º 12, p. 3068, nov. 2018, doi: 10.3390/molecules23123068.
- [30] P. K. Tr, M. Ar, V. Ks, y D. Sm, «Antimicrobial Activity of *Usnea ghattensis* G. Awasthi and *Usnea undulata* Stirt», p. 7, 2016.
- [31] L. P. Timbreza, J. L. D. Reyes, y C. H. C. Flores, «Antibacterial activities of the lichen *Ramalina* and *Usnea* collected from Mt. Banoi, Batangas and Dahilayan, Bukidnon, against multi-drug resistant (MDR) bacteria», p. 16, 2017.
- [32] R. Chauhan y J. Abraham, «In Vitro Antimicrobial Potential of the Lichen *Parmotrema* sp. Extracts against Various Pathogens», *Iran J Basic Med Sci*, vol. 16, n.º 7, Art. n.º 7, 2013.
- [33] A. Shcherbakova *et al.*, «Antimicrobial and antioxidant activity of *Evernia prunastri* extracts and their isolates», *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 37, n.º 8, p. 129, ago. 2021, doi: 10.1007/s11274-021-03099-y.
- [34] K. Victor *et al.*, «Design, synthesis and antimicrobial activity of usnic acid derivatives», *MedChemComm*, vol. 9, n.º 5, pp. 870-882, 2018, doi: 10.1039/C8MD00076J.
- [35] S. Ilic, S. Cohen, M. Singh, B. Tam, A. Dayan, y B. Akabayov, «DnaG Primase—A Target for the Development of Novel Antibacterial Agents», *Antibiotics*, vol. 7, n.º 3, p. 19, 2018, doi: 10.3390 / antibiotics7030072.
- [36] S. Sinha *et al.*, «Usnic acid modifies MRSA drug resistance through down-regulation of proteins involved in peptidoglycan and fatty acid biosynthesis», *FEBS Open Bio*, vol. 9, n.º 12, pp. 2025-2040, dic. 2019, doi: 10.1002/2211-5463.12650.
- [37] D. Du *et al.*, «Multidrug efflux pumps: structure, function and regulation», *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 16, n.º 9, pp. 523-539, sep. 2018, doi: 10.1038/s41579-018-0048-6.
- [38] J. B. Moura *et al.*, «In vitro antimicrobial activity of the organic extract of *Cladonia substellata* Vainio and usnic acid against *Staphylococcus* spp. obtained from cats and dogs», *Pesqui. Veterinária Bras.*, vol. 37, n.º 4, pp. 368-378, abr. 2017, doi: 10.1590/s0100-736x2017000400011.
- [39] M. Barrera Tomas, G. E. Tomas Chota, P. Sheen Cortavarría, P. Fuentes Bonilla, M. A. Inocente Camones, y J. C. Santiago Contreras, «Synthesis of acyl-hydrazone from usnic acid and isoniazid and its anti-*Mycobacterium tuberculosis* activity», *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 46, n.º 3, pp. 17-21, sep. 2017, doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v46n3.61980.
- [40] R. Kukla *et al.*, «IN VITRO ANTIBACTERIAL ACTIVITY OF USNIC ACID AND OCTYL GALLATE AGAINST RESISTANT ENTEROCOCCUS STRAINS», *Mil. Med. Sci. Lett.*, vol. 83, n.º 3, pp. 104-113, sep. 2014, doi: 10.31482/mmsl.2014.020.
- [41] A. Priya, A. Selvaraj, D. Divya, R. Karthik Raja, y S. K. Pandian, «In Vitro and In Vivo Anti-infective Potential of Thymol Against Early Childhood Caries Causing Dual Species *Candida albicans* and *Streptococcus mutans*», *Front. Pharmacol.*, vol. 12, p. 760768, nov. 2021, doi: 10.3389/fphar.2021.760768.
- [42] P. Nithyanand, R. M. Beema Shafreen, S. Muthamil, y S. Karutha Pandian, «Usnic acid, a lichen secondary metabolite inhibits Group A *Streptococcus* biofilms», *Antonie Van Leeuwenhoek*, vol. 107, n.º 1, pp. 263-272, ene. 2015, doi: 10.1007/s10482-014-0324-z.
- [43] S. Oran, S. Sahin, P. Sahinturk, S. Ozturk, y C. Demir, «Antioxidant and Antimicrobial Potential, and HPLC Analysis of Stictic and Usnic Acids of Three *Usnea* Species from Uludag Mountain (Bursa, Turkey)», p. 10, 2016.

- [44] L. Fitriani, Afifah, F. Ismed, y A. Bakhtiar, «Hydrogel Formulation of Usnic Acid and Antibacterial Activity Test Against *Propionibacterium acne*», *Sci. Pharm.*, vol. 87, n.º 1, p. 1, dic. 2018, doi: 10.3390/scipharm87010001.
- [45] E. Bachtiar, E. Hermawati, L. D. Juliawaty, y Y. M. Syah, «Antibacterial properties of usnic acid against vibriosis», *Res. J. Chem. Environ.*, p. 3, 2020.
- [46] M. G. Tozatti *et al.*, «Activity of the Lichen *Usnea steineri* and its Major Metabolites against Gram-positive, Multidrug-resistant Bacteria», *Nat. Prod. Commun.*, vol. 11, n.º 4, p. 1934578X1601100, abr. 2016, doi: 10.1177/1934578X1601100419.
- [47] Lucarini, Rodrigo *et al.*, «Antimycobacterial activity of *Usnea steineri* and its major constituent (+)-usnic acid», *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 11, n.º 20, mar. 2012, doi: 10.5897/AJB11.3551.
- [48] D. R. P. Loureiro *et al.*, «Structures, Activities and Drug-Likeness of Anti-Infective Xanthone Derivatives Isolated from the Marine Environment: A Review», *Molecules*, vol. 24, n.º 2, p. 243, ene. 2019, doi: 10.3390/molecules24020243.
- [49] Resende, Diana I. S. P. *et al.*, «Lichen Xanthenes as Models for New Antifungal Agents», *Molecules*, vol. 23, n.º 2617, 2018, doi: doi:10.3390/molecules23102617.
- [50] A. F. Dávalos *et al.*, «Identification of Nontuberculous Mycobacteria in Drinking Water in Cali, Colombia», *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, n.º 16, p. 8451, ago. 2021, doi: 10.3390/ijerph18168451.

Análisis de la modulación multiplexación por división de frecuencia generalizada

Analysis of generalized frequency division multiplexing modulation

Jorge Luis Blanco-Orta¹, María del Carmen Guerra-
Martínez², Francisco Reinerio Marante-Rizo³

Fecha de recepción: 11 de mayo, 2022

Fecha de aprobación: 22 de agosto, 2022

Blanco-Orta, J.L.; Guerra-Martínez, M.C; Marante-Rizo, F.R.
Análisis de la modulación multiplexación por división de fre-
cuencia generalizada. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 3.
Julio-Setiembre, 2023. Pág. 158-169.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6201>

1 Emisora Municipal Radio Mariel. Cuba. Correo electrónico: jorgeluisbo@nauta.cu

 <https://orcid.org/0000-0001-9592-7818>

2 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. Correo electrónico: mariagm@tele.cujae.edu.cu

 <https://orcid.org/0000-0003-1989-4414>

3 Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría". Cuba. Correo electrónico: marante@tele.cujae.edu.cu.

 <https://orcid.org/0000-0003-3277-1371>

Palabras clave

GFDM; OFDM; 6G.

Resumen

En el presente artículo se hace una investigación de la modulación Multiplexación por División de Frecuencia Generalizada (GFDM) y su influencia para mejorar la estructura de la capa física, teniendo en cuenta las ventajas inherentes que presenta para el desarrollo de nuevas tecnologías. Se establece una comparación con la modulación Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM), utilizada en la comunicación móvil de cuarta generación (4G). Definiendo las características que diferencian a cada una de las señales, así como los beneficios para la arquitectura de red, las tecnologías habilitadoras y por ser una modulación que puede solucionar problemas en sistemas masivos de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). La investigación se realiza con el propósito de lograr una mayor transmisión de datos, por ser esta una tecnología clave, que afrontará problemas similares en futuros sistemas y mejorar la flexibilidad de la sexta generación (6G).

Keywords

GFDM; OFDM; 6G.

Abstract

In this article, an investigation is made of the Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) modulation and its influence to improve the structure of the physical layer, taking into account the inherent advantages it presents for the development of new technologies. A comparison is made with Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation, used in the fourth generation (4G) mobile communication. Defining the characteristics that differentiate each of the signals, as well as the benefits for the network architecture, the enabling technologies and for being a modulation that can solve problems in massive multiple input multiple output (MIMO) systems. The research is carried out with the purpose of achieving greater data transmission, as this is a key technology that will face similar problems in future systems and improve the flexibility of the sixth generation (6G).

Introducción

En este siglo XXI, se ha experimentado un creciente desarrollo en la industria de las telecomunicaciones debido a la gran demanda que existe por parte de los usuarios para adquirir una mayor calidad en la transmisión y mejoras en los servicios de la red. Esto ha provocado por parte del sector de las comunicaciones inalámbricas la búsqueda de nuevas estrategias y tecnologías que permitan la coexistencia de los viejos y nuevos servicios en el espectro radioeléctrico. Con un tránsito interesante desde la primera generación (1G, por sus siglas en inglés) hasta la quinta generación (5G, por sus siglas en inglés), en el que se aprecia que cada nueva generación de tecnología acelera aún más la llegada de nuevos dispositivos y servicios según sus requerimientos de conexión, planteando nuevos escenarios en el uso de tecnologías móviles.

La 5G ya alcanza 1000 veces más capacidad que la 4G, con una latencia de 1 ms y una velocidad de hasta 10 Gb/s [1], lo que ha permitido cambiar por completo el panorama y la industria de los servicios en la nube, del entretenimiento y la comunicación. Aun así, las

industrias de las comunicaciones no se han detenido en su afán de alcanzar nuevos niveles de calidad de la señal y una mayor eficiencia del espectro radioeléctrico, en interés de hacer más flexible la capa física para el desarrollo de la sexta generación (6G, por sus siglas en inglés) [2].

Con la 6G, no solo se incrementarán las capacidades de las redes actuales, sino también habrá un aumento de los requisitos y escenarios de uso, incluyendo: banda ancha móvil mejorada (eMBB, por sus siglas en inglés), comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC, por sus siglas en inglés), y comunicaciones ultra fiables de baja latencia (URLLC, por sus siglas en inglés). Sin embargo, el escenario de aplicación que se ha previsualizado para las redes 6G posee retos donde la modulación OFDM podría tener limitaciones. El requerimiento de OFDM de preservar la ortogonalidad entre subportadoras individuales es esencial para la comunicación máquina a máquina (M2M, por sus siglas en inglés). Dada la necesidad de bajo consumo de potencia que influye en forma negativa en el proceso de sincronización, este procedimiento no es posible con la modulación OFDM [2,3]. Otra desventaja del sistema OFDM es la alta radiación fuera de banda (OOB, por sus siglas en inglés) que resulta de la forma rectangular del pulso [4]. Debido a estas deficiencias, OFDM puede satisfacer los requerimientos de la 6G de forma limitada. En este contexto la modulación por Multiplexación por División de Frecuencia Generalizada (GFDM, por sus siglas en inglés) está concebida para la modulación de bloques independientes, donde cada bloque consiste en un número de subportadoras y símbolos. Los símbolos de datos pertenecientes a las subportadoras son filtros con un prototipo que es desplazado circularmente en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Es una modulación que presenta grandes ventajas en relación a los requisitos que se esperan pueda cumplir la 6G [5].

Con la propuesta de solución mediante la utilización de la modulación GFDM, por ser una alternativa de esquema multiportadora, se puede ofrecer una mayor flexibilidad en la estructura para la 6G. Además, proporciona una mejor compartición del espectro, dándole solución a mucho de los problemas que se puede presentar en el despliegue de esta nueva generación de la telefonía móvil, dentro de un entorno con una alta movilidad.

Metodología

La investigación que se propone en este artículo es un análisis que recoge los conceptos, evolución y despliegue de la modulación GFDM, donde se estableció el siguiente orden de etapas: modelo matemático de GFDM, matriz de transmisión A, receptor GFDM, inserción de prefijo cíclico en GFDM y simulación. Para el desarrollo de esta investigación se tuvieron en cuenta algunas limitantes que se pueden encontrar en el futuro despliegue de un sistema con tecnología 6G, como es el caso de los problemas relacionados con aplicaciones inteligentes que utilizan la inteligencia artificial (IA, por sus siglas en inglés) y aprendizaje de máquinas (ML, por sus siglas en inglés). Mediante este procedimiento se presenta la principal contribución de este artículo, con el objetivo de desarrollar una investigación y posible desarrollo de esta modulación, por sus numerosos beneficios, que se relacionan con los desafíos que puedan presentar las nuevas generaciones de telefonía móvil, por ser la modulación más acorde a las nuevas exigencias. La mayoría de los artículos utilizados se encuentran indexadas en la base de datos de la IEEE, permitiendo de esta manera lograr un mayor nivel de profundidad dentro de cada etapa de elaboración del artículo.

Modelo matemático de GFDM

La GFDM está basada en la modulación de bloques independientes que están compuestos de un número de subportadoras y de subsímbolos. Estos bloques son modulados mediante bancos de filtros compuestos por un pulso prototipo desplazado de manera circular en tiempo y frecuencia [6]. De esta forma evita transmitir menor OOB, permitiendo un uso más eficiente del espectro y una mayor flexibilidad en entornos multiusuario, como se muestra en la figura 1.

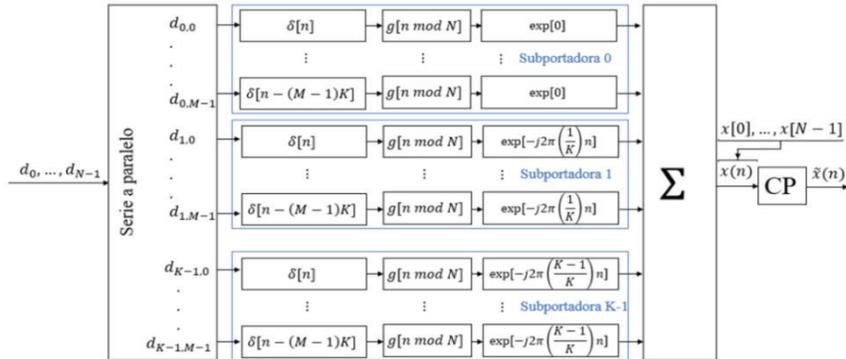


Figura 1. Diagrama de bloques del modulador GFDM. Fuente: [4]

El modulador recibe el vector de N elementos \vec{d} , el cual se descompone en K subportadoras con M subsímbolos cada una. El vector resultante \vec{d} contiene $N = K M$ elementos en el que el elemento $d_{k,m}$ corresponde con el dato transmitido en la subportadora k del subsímbolo m del bloque de elementos.

$$\vec{d} = (\vec{d}_0^T, \dots, \vec{d}_{M-1}^T)^T \text{ con } \vec{d}_m = (d_{0,m}, \dots, d_{K-1,m})^T \quad (1)$$

Cada subsímbolo pasa por un banco de filtros compuesto por el pulso utilizado para transmitir cada dato desplazado circularmente en tiempo. Antes de esto, cada subsímbolo se sobremuestra con tasa K consiguiendo que los datos adyacentes no intervengan en el filtrado [6,7]. Gracias al diseño del filtro prototipo y al sobremuestreo de cada subsímbolo se consigue que cuando se filtra la muestra n del subsímbolo m el filtro tenga valor nulo en la posición de las demás $K - 1$ muestras de los restantes subsímbolos, donde el filtro no tenga valor nulo y se obtenga un valor en las muestras de 0.

En GFDM, como se explica en [4], se utilizan varios filtros prototipos $[n]$, mejorando la eficiencia del espectro y con el uso de este filtro tanto en el transmisor como en el receptor mejora el rendimiento de la tasa de errores de bits (BER, por sus siglas en inglés). Con este filtro no debe introducir interferencia entre símbolos, sino que cumple con algunos criterios, uno de ellos es el primer criterio de Nyquist que se relaciona con el espectro de frecuencia de la señal del transmisor con la interferencia entre símbolos, que frecuentemente se trata de un coseno alzado (RC, por sus siglas en inglés), donde el tiempo del filtro RC está representando según la ecuación (2). Determinando T como el período del símbolo y α como el factor de roll-off del filtro. Con el dato $d_{k,m}$, que es transmitido con el pulso correspondiente, para el índice n que indica el tiempo discreto, según la ecuación (3), cada pulso $g_{k,m}[n]$, es una versión desplazada circularmente en tiempo del pulso $g_{k,0}[n]$ debido a la operación módulo y una versión desplazada en frecuencia conseguida gracias a la exponencial compleja. Para las muestras transmitidas $\vec{x} = (\mathbf{x}[\mathbf{n}])^T$ que se obtiene con la suma de todos los símbolos transmitidos, como aparecen en la ecuación (4), una vez obtenido \vec{x} se añade el prefijo cíclico de N_{CP} muestras tras el modulador GFDM para producir $\vec{\tilde{x}}$, como se explica en [8].

$$g_{RC}(t) = \text{sinc} \left(\frac{t}{T} \right) \frac{\cos \left(\frac{\pi \alpha t}{T} \right)}{1 - \left(\frac{2 \alpha t}{T} \right)^2} \tag{2}$$

$$g_{k,m}[n] = g[(n - mK) \bmod N] \exp \left[-j \frac{2 \pi k n}{K} \right] \tag{3}$$

$$x[n] = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{m=0}^{M-1} g_{k,m}[n] d_{k,m}, n = 0, \dots, N - 1 \tag{4}$$

Matriz de transmisión A

Las operaciones matemáticas de la ecuación (4), usualmente se utilizan de manera matricial. Definiendo una matriz de transmisión A de tamaño KM x KM de manera que la ecuación (4) se puede reformular como:

$$\vec{x} = A \vec{d} \tag{5}$$

La estructura de la matriz A queda de la siguiente forma:

$$A = (\vec{g}_{0,0} \dots \vec{g}_{k-1,0} \quad \vec{g}_{0,1} \dots \vec{g}_{k-1,M-1}) \tag{6}$$

En esta matriz las columnas son la versión desplazada circularmente en tiempo y en frecuencia de la primera columna $\vec{g}_{0,0}$ que agrupan los K pulsos encargados de transmitir cada k muestras del primer subsímbolo. Situando los K pulsos transmisores de las k muestras del segundo subsímbolo y así sucesivamente hasta tener M bloques de K pulsos transmisores [9,10]. Donde cada agrupación de K pulsos realiza la elevación en frecuencia correspondiente. El pulso k de cada agrupación se elevaría a la frecuencia $\frac{k-1}{K}$. De este modo, se divide el espectro en K bandas de manera que cada muestra del subsímbolo M se sitúa en la banda k correspondiente, quedando construida la matriz A con M bloques de k pulsos cada uno [11], como se representa en la figura 2.

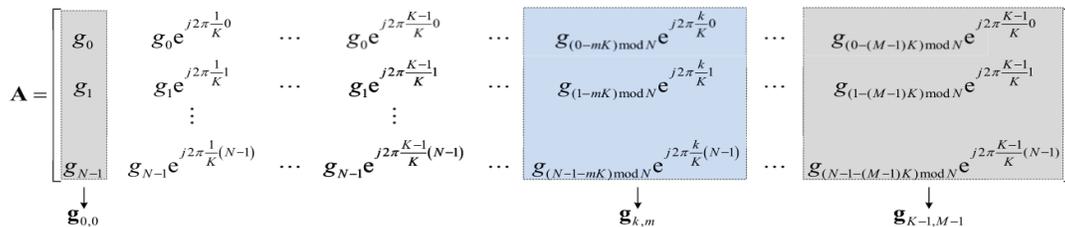


Figura 2. La estructura de la modulación GFDM para la matriz A. Fuente: [11].

Para la mejor comprensión de esta matriz se han realizado las siguientes representaciones tomando unos valores de M = 7 para los bloques y de K= 4 pulsos cada uno. Teniendo en cuenta la simulación de la señal GFDM que se realizó en [4,12] mediante el software MATLAB. En la simulación se observó que el resultado era el deseado en la señal que se obtiene ya que representa el valor absoluto de la matriz de transmisión y los pulsos de filtros, como se muestra en la figura 3.

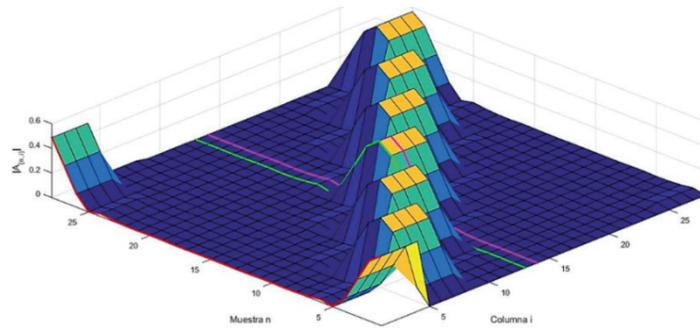


Figura 3. Valor absoluto de la matriz de transmisión. Fuente: [4].

Además, los filtros desplazados de M bloques de K como se muestra en la figura 3. A continuación, se explicarán los pulsos indicados en color rojo, verde y magenta, que se ejemplifica en la figura 4.

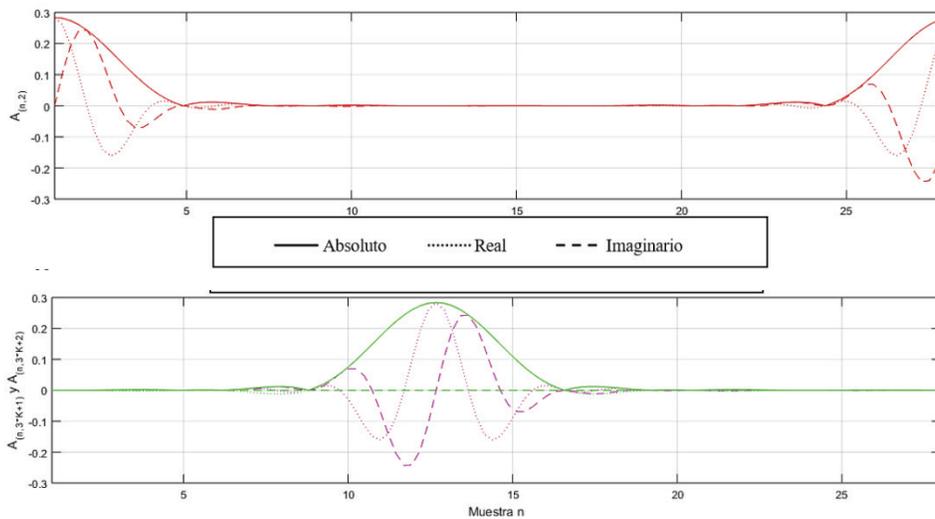


Figura 4. Representación de tres pulsos de la matriz de transmisión. Fuente: [4].

Donde se puede observar que el pulso rojo filtra las muestras del primer subsímbolo y se hace 0 para los valores donde están situadas las siguientes. En este ejemplo sería en la posición 1, siendo nulas las demás muestras con valor $n = mK + 1, m = 1, \dots, M-1$. Por otra parte, tanto el pulso verde como el magenta se encargan de transmitir el mismo subsímbolo, en este caso la tercera muestra de los mismos ($n = 3K + 1 = 13$), pero se observa que su composición en parte real e imaginaria es distinta. Esto es debido a que cada uno está situado a una frecuencia distinta [4]. Para este caso particular se tiene que el pulso verde corresponde con el primero del bloque de K pulsos, es decir, el pulso $k = 1$. Sustituyendo en (3) se obtiene:

$$g_{k=1,m=3}[n] = g[(n) \bmod N] \exp [0] \quad (7)$$

Es decir, el pulso verde es el pulso prototipo desplazado en el tiempo, pero no en frecuencia. Es por ello que su parte imaginaria tiene un valor nulo. No obstante, el pulso magenta es el segundo del bloque, es decir, $k = 2$. Aplicando (3) como se hizo en (7) se tiene un desplazamiento en frecuencia [13]. Lo que refleja que, aunque ambos pulsos tienen la misma respuesta en valor absoluto y se encargan de transmitir la posición de la muestra del símbolo, el resultado es distinto debido a la elevación en frecuencia.

de recepción y, por lo tanto, no es necesario un bloque de ZF teniéndose directamente $\vec{\hat{d}} = B\vec{y}$, donde finalmente los símbolos estimados $\vec{\hat{d}}$ son demapeados para obtener la secuencia de bits en el receptor [14-15]. En MMSE la matriz B que se obtiene es:

$$B_{MMSE} = (R_W^2 + A^H H^H H A)^{-1} A^H H^H \quad (11)$$

Donde R_W^2 es la matriz de covarianza del ruido. En la evolución del sistema se encuentra el diagrama en bloque para la transmisión y la recepción de GFDM, que se muestra en la figura 6.

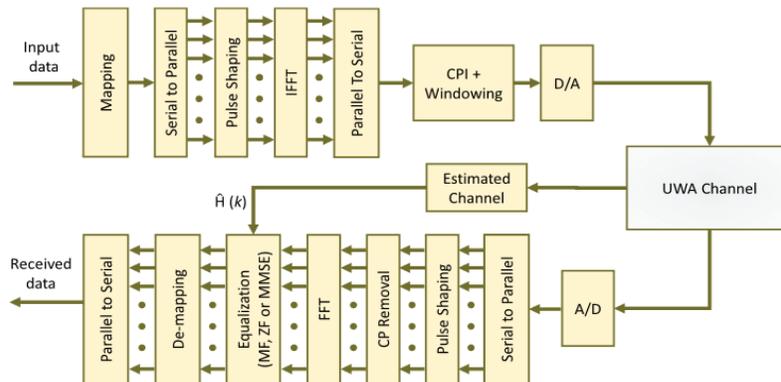


Figura 6. Bloques del sistema de transmisión y recepción GFDM. Fuente: [16].

Con esta estructura la GFDM tiene un mejor desempeño con el estándar de modulación de amplitud en cuadratura (QAM, por sus siglas en inglés), logrando mayor eficiencia con casi todas las condiciones no ortogonales, permitiendo estar libre de interferencias autogeneradas, minimizando los problemas generados de la singularidad con la matriz de modulación cuando se emplea un número par de subportadoras y subsímbolos, lo que ayuda a bajar las emisiones OOB y disminuye la complejidad de la implementación [16,17].

La principal propiedad que permite diferenciar la GFDM de la OFDM es la posibilidad de dividir información dada en las dimensiones de tiempo y frecuencia en K subportadoras y M subsímbolos. Esto logra adaptar el espectro a los requisitos existentes, configurando la señal GFDM para cubrir una porción del ancho de banda con un elevado número de subportadoras como en OFDM. El sistema OFDM puede producir alta radiación OOB y una menor eficiencia en ancho de banda en comparación con GFDM [1,18], debido a que el sistema OFDM utiliza un CP por símbolo. Por su capacidad la GFDM puede hacer más flexible la estructura, haciendo frente a los diferentes requisitos, ya que con esta modulación es posible diseñar la estructura de tiempo-frecuencia para que coincida con las limitaciones de tiempo para las aplicaciones de baja latencia.

Inserción de prefijo cíclico en GFDM

El paquete de datos en la GFDM solo requiere un CP por bloque de símbolos transmitidos. La figura 7 presenta la estructura de un paquete de datos GFDM donde los símbolos de datos sobre cada subportadora se filtran a través de un filtro pasabanda bien localizado, con la finalidad de limitar la ICI [19]. La utilización del prefijo cíclico aporta eficiencia espectral y reduce la duración total de la trama, lo que favorece a las comunicaciones de baja latencia y como resultado un menor procesamiento de la señal. En GFDM el uso del prefijo cíclico se vuelve más eficiente que en OFDM, al insertar un único prefijo cíclico por cada símbolo completo [11].

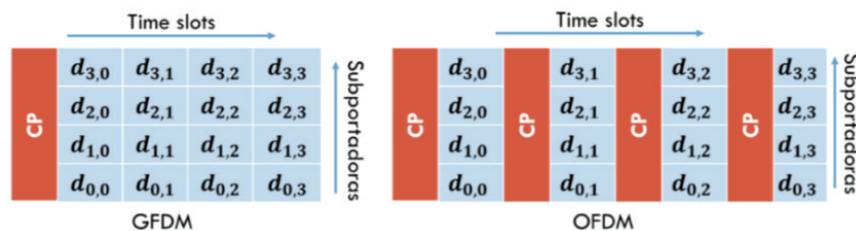


Figura 7. Comparación del prefijo cíclico entre GFDM y OFDM. Fuente: [4]

Con esto se logra la creación de tramas con duración más flexible, para que sean utilizadas en aplicaciones que requieran una baja latencia, logrando tramas más cortas. Por eso, para las comunicaciones donde el tiempo de transmisión no es crítico, se pueden utilizar todos los subsímbolos para transmitir los datos de un usuario específico. Al incrementar el número de símbolos por bloque, se obtiene una pérdida de eficiencia espectral menor para valores más grandes de la longitud del prefijo cíclico. Esto es debido a que el prefijo cíclico está asignado a más ranuras de tiempo.

Simulación

La GFDM se ha tenido en cuenta para los sistemas de radar, como se analizó en [20], por ser una de las posibles soluciones para mitigar las interferencias internas dentro de un sistema de radar con sistema de comunicación (RadCom, por sus siglas en inglés). La simulación fue desarrollada en un laboratorio, mediante tarjetas de detección de señales, para simular una comunicación simultánea. Fueron medidas para una frecuencia de portadora de 24 GHz, con $N = 256$ de subportadoras, un número de símbolos con $M = 32$ y un total de símbolos en la banda ancha con $B = 113.92$ MHz, donde se tuvieron en cuenta los parámetros como NMSE para ver la recepción de la señal del radar después de ser filtrada en relación con la señal recibida por el radar sin interferencia. Se obtuvieron resultados interesantes para la señal mostrada, como aparece en la figura 8 a), la señal reconstruida por OFDM y GFDM para los radares, con determinados valores diferentes de radio para la señal con interferencia (SIR_{in} , por sus siglas en inglés), se observa que la interferencia dentro de radar OFDM, genera una mayor emisión OOB. En la figura 8 b), se muestra la interferencia después del proceso filtrado SIR_{out} proveniente de los radares, donde el radar de GFDM presenta una SIR_{out} mejor con un aproximado de 9 dB en relación con el radar OFDM, donde se adicionó una banda guarda de ($N_{GB} = N / 32$), desde donde se determinó dos radares para la SIR_{in} con la misma banda guarda, lo que demostró que OFDM se le generaba más interferencia que en el radar GFDM, sin bandas de guarda. Lo que determinó que los valores de SIR_{out} que se utilizó en el radar de OFDM, requiere más banda guarda. Por eso en la figura 10 c), se comparó la SIR_{out} para la versión de la guarda de la banda ancha, se compararon ambos radares para ($SIR_{in} = -20$ dB), donde se puede ver que el radar GFDM solo requiere $N_{GB} = N / 64$ para que $SIR_{out} = 20$ dB y el radar OFDM requiere al menos $N_{GB} = N / 2$, para que $SIR_{out} = 15$ dB. El mayor número de subportadoras de banda guarda en OFDM causa no solo el decrecimiento de la eficiencia espectral en los datos de la transmisión, sino también una disminución de la capacidad de resolución dentro del radar. De hecho, la interferencia intrínseca causada por la no ortogonalidad de las subportadoras GFDM se mitiga completamente mediante el uso de la técnica de procesamiento de GFDM propuestas. Para un entorno multiusuario, donde puede ocurrir interferencia entre usuarios en canales adyacentes, el radar GFDM presenta menos interferencia entre sistemas que el radar OFDM. Por lo tanto, el radar GFDM requiere una banda de protección más estrecha y tiene una mejor resolución de alcance que el radar OFDM, lo que hace que la forma de onda GFDM sea un mejor candidato para los nuevos sistemas de comunicaciones.

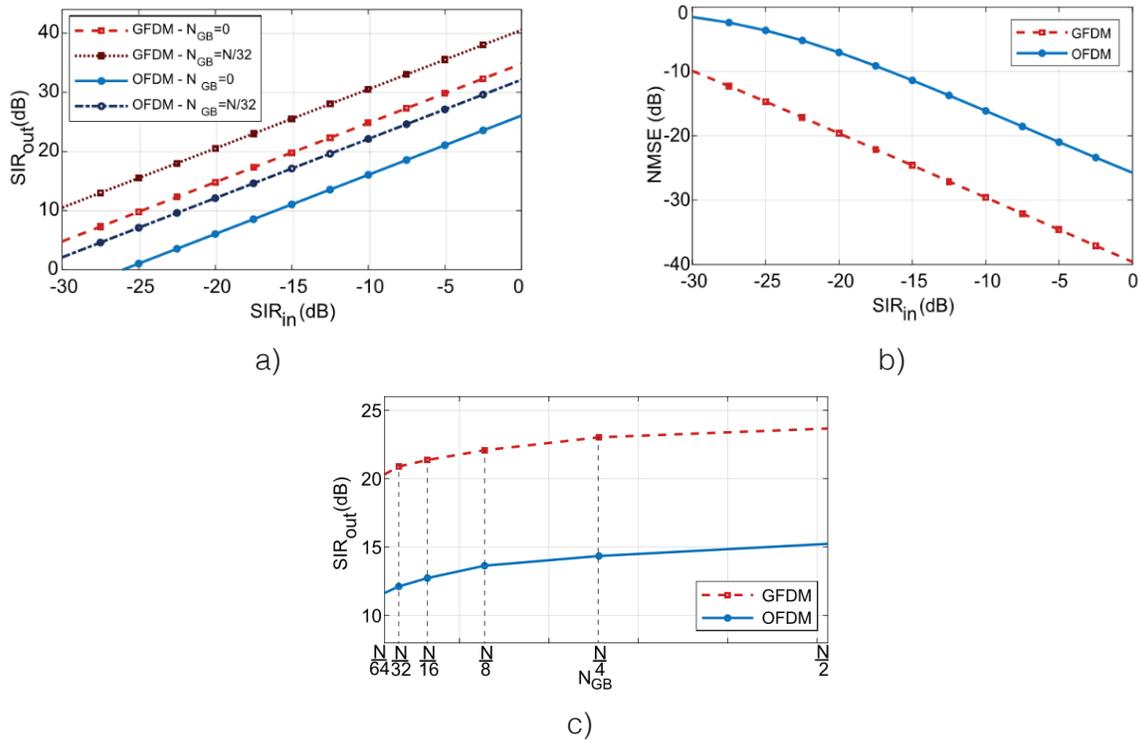


Figura 8. Comparación de GFDM y OFDM. a) Variación de NMSE en la recepción de la señal. b) Variación post-filtrado de SIR. c) Variación de post-filtrado de SIR en función de la guarda de la banda ancha para $SIR_{in} = -20$ dB.

Conclusiones

Con la modulación GFDM se mejoran las capacidades en el enlace descendente, aportando eficiencia temporal, ya que introduce un solo CP para transmitir la información y en el enlace ascendente se consigue una mayor eficiencia espectral, logrando una menor radiación OOB, que permite un uso más eficiente del espectro. Todo ello se relaciona con los desafíos que los sistemas con tecnología 6G están tratando de superar, además de una mejor transmisión en entornos multiusuario tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

La modulación GFDM aporta una mayor flexibilidad a la hora de su construcción, mediante los parámetros de diseño M y K que incluye, logrando una transmisión basada en bloques que utilizan la inserción de CP. Esto permite que la GFDM se ajuste a distintos anchos de banda para distintas aplicaciones y que permitan dividir la banda disponible en un número de usuarios que se adapte a los escenarios. Lo que puede ayudar al desarrollo de una nueva estructura más flexible para la capa física, logrando con esta configuración se pueda cubrir una mayor área que con la modulación OFDM.

La interferencia intrínseca causada por la no ortogonalidad de las subportadoras GFDM se puede mitigar completamente mediante el uso de la técnica de procesamiento de radar GFDM propuesta. También se verificó que, en entornos multiusuario, donde puede ocurrir interferencia entre usuarios en canales adyacentes, el radar GFDM presenta menos interferencia entre sistemas que el radar OFDM. Por lo tanto, el radar GFDM requiere una banda de protección más estrecha y tiene una mejor resolución de alcance que el radar OFDM. Por eso es una opción atractiva para sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, por sus siglas

en inglés), por lo que es posible diseñar su estructura de manera adaptativa para que coincida con las limitaciones de tiempo y latencia del sistema, facilitando el salto de las comunicaciones inalámbricas hacia nuevas tecnologías.

Referencias

- [1] A. Hilario-Tacuri, "Computational Tool for the Evaluation of Waveform Candidates of Beyond 5G and 6G Systems," 2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON52678.2021.9532648.
- [2] P. V. Saicharan, V. B. S. I. Dutt, C. Venkat Rao and S. Sohith, "Performance Analysis of Clipping Techniques for 5G NR higher-order UPMC-QAM Systems," 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2021, pp. 242-249, doi: 10.1109/ICCES51350.2021.9489103.
- [3] U. Farooq and A. Miliou, "Channel Equalization for converged OFDM-Based 5G mm-wave A-RoF System at 60 GHz," 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), 2021, pp. 1263-1267, doi: 10.1109/CCWC51732.2021.9375831.
- [4] B. de los Ríos, "Estudio de formas de onda candidatas para comunicaciones 5G: Generación y análisis de señal GFDM," Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [5] V. Nivetha and V. Sudha, "BER Analysis of GFDM System Under Different Pulse Shaping Filters," 2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2021, pp. 53-56, doi: 10.1109/WiSPNET51692.2021.9419396.
- [6] W. Indah Sari, A. Fitriani Isnawati and K. Ni'amah, "Performance Analysis GFDM Using MMSE Equalization in Audio Transmission," 2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), 2021, pp. 141-145, doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530797.
- [7] Z. Li et al., "Preliminary On-Orbit Performance Test of the First Polarimetric Synchronization Monitoring Atmospheric Corrector (SMAC) On-Board High-Spatial Resolution Satellite Gao Fen Duo Mo (GFDM)," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, doi: 10.1109/TGRS.2021.3110320.
- [8] H. -Y. Wang, C. -H. Cheng, B. Su and G. -R. Lin, "QAM-GFDM of Dual-Mode VCSEL Mixed 28-GHz MMW Carrier for Fiber-Wireless Link," in Journal of Lightwave Technology, vol. 39, no. 19, pp. 6076-6084, Oct.1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2021.3096246.
- [9] Y. Guo, X. Liu, X. Liu and T. S. Durrani, "Energy-Efficient Resource Allocation for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in GFDM Cooperative Communications," in *IEEE Networking Letters*, doi: 10.1109/LNET.2022.3141489.
- [10] K. Choi, "FD-FBMC: A Solution for Multicarrier Full Duplex Cellular Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 25, no. 2, pp. 617-621, Feb. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3028375.
- [11] Y. Li, K. Niu and C. Dong, "Polar-Coded GFDM Systems," in IEEE Access, vol. 7, pp. 149299-149307, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947254.
- [12] H. -F. Wang, F. -B. Ueng and C. -T. Chiang, "High Spectral Efficiency and Low Error Rate MIMO-GFDM for Next-Generation Communication Systems," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 1, pp. 503-517, Jan. 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3127912.
- [13] V. Kishore, S. P. Valluri, V. M. Vakamulla, M. Sellathurai, A. Kumar and T. Ratnarajah, "Performance Analysis Under Double Sided Clipping and Real Time Implementation of DCO-GFDM in VLC Systems," in Journal of Lightwave Technology, vol. 39, no. 1, pp. 33-41, 1 Jan.1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3026381.
- [14] E. N. O. Herawati, A. F. Isnawati and K. Ni'amah, "Analysis of GFDM-OQAM Performance Using Zero Forcing Equalization," 2021 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), 2021, pp. 135-140, doi: 10.1109/COMNETSAT53002.2021.9530809.
- [15] N. Sharma et al., "Aerial Base Station Assisted Cellular Communication: Performance and Trade-off," in IEEE Transactions on Network Science and Engineering, doi: 10.1109/TNSE.2021.3052984.
- [16] M. Murad, I. A. Tasadduq and P. Otero, "Towards Multicarrier Waveforms Beyond OFDM: Performance Analysis of GFDM Modulation for Underwater Acoustic Channels," in IEEE Access, vol. 8, pp. 222782-222799, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043718.
- [17] Y. Liu, X. Zhu, E. G. Lim, Y. Jiang and Y. Huang, "A Semi-Blind Multiuser SIMO GFDM System in the Presence of CFOs and IQ Imbalances," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 1, pp. 48-63, Jan. 2022, doi: 10.1109/TWC.2021.3093476.

- [18] T. Levanen, O. Tervo, K. Pajukoski, M. Renfors and M. Valkama, "Mobile Communications Beyond 52.6 GHz: Waveforms, Numerology, and Phase Noise Challenge," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 1, pp. 128-135, February 2021, doi: 10.1109/MWC.001.2000185.
- [19] R. Mulyawan, R. Averly, I. Syafalni, N. Sutisna and T. Adiono, "Dynamic Pilot Allocation for Channel Estimation in High-Mobility OFDM Receiver," *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEIC51217.2021.9369750.
- [20] J. B. Sanson, D. Castanheira, A. Gameiro and P. P. Monteiro, "Non-Orthogonal Multicarrier Waveform for Radar with Communications Systems: 24 GHz GFDM RadCom," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128694-128705, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940299.