



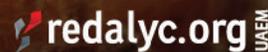
TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Enero - Marzo 2024
Volumen 37-1
ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos



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

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 37-1. Enero-Marzo,
2024 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618

Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr

Web: <https://www.tec.ac.cr/editorial>

http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

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

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

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

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

Publicación y directorio en catálogos



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Efecto de diferentes tensiones del agua en el suelo sobre la absorción nutricional de macronutrientes en el cultivo de cebolla (<i>Allium cepa</i>) c.v. Álvara en ambiente protegido Effect of different water tensions in the soil on the nutritional absorption of macronutrients in the cultivation onion (<i>Allium cepa</i>) c.v. Álvara in a protected environment <i>Adrián Enrique Chavarría-Vidal, Mario Morales-Sánchez, Freddy Soto-Bravo</i>	3
Evaluación de TiO ₂ sensibilizado con tintes de trímeros de cobalto como fotocatalizador para la producción de hidrógeno a partir de la separación de agua Evaluation of TiO ₂ sensitized with cobalt trimer dyes as photocatalyst for water-splitting hydrogen production <i>Daniela Camacho-Ureña, Leslie W. Pineda, J. Esteban Durán-Herrera</i>	17
Reconversión agroecológica de páramos en Colombia: propuesta de herramienta para clasificar fincas Agroecological reconversion of moorlands in Colombia: proposal for a farm's classification tool <i>Diego Alejandro Rojas-Ramírez, Ingrid Varela-Benavides, Tomas Guzmán-Hernández, Fabian Enrique Martinez-Camelo</i>	27
Relaciones entre variables en berenjena (<i>Solanum melongena</i>) Relations among variables in eggplant (<i>Solanum melongena</i>) <i>José Eladio Monge-Pérez, Cristina Arguedas-García, Michelle Loría-Coto</i>	40
Modelación computacional de la corrosión del refuerzo metálico de un concreto carbonatado Computational modelling of steel rebars corrosion in carbonated concrete <i>Bruno Chinè-Polito, Ronald Jiménez-Salas, Rommel Cuevas-Kauffmann</i>	51
Comparación experimental de anemómetros de copas Experimental comparison of cup anemometers <i>Maximino Jiménez-Ceciliano, Gustavo Richmond-Navarro</i>	65
Evaluación del impacto sonoro del tren urbano y sus implicaciones sociales: análisis del tramo San José – Tres Ríos Evaluation of the sound impact of the urban train and its social implications: analysis of the San José – Tres Ríos section <i>Nidia Cruz-Zúñiga, Allan Rojas-Ramírez</i>	77

Efectos de la longitud de onda de luz, el fotoperiodo y la salinidad en los parámetros de producción de <i>Isochrysis galbana</i>	
Effects of the wavelength of light, photoperiod, and salinity in the production parameters of <i>Isochrysis galbana</i>	
<i>Silvia Ramírez-Flores, Francinie Murillo-Vega, Fabian Villalta-Romero, Maritza Guerrero-Barrantes</i>	88
Respuesta al fertirriego por goteo en arroz (<i>orriza sativa</i>, variedad conarroz 3) en el trópico húmedo costarricense	
Response to the drip fertigation in paddy (<i>orriza sativa</i> , conarroz 3 variety) in the costarican humid tropic	
<i>Gregory Guevara, Alexander Mendoza</i>	102
Modelos de control de acceso más utilizados en la seguridad de datos médicos	
Access control models most used in medical data security	
<i>Brian Campos-Montero, Cesar Rodríguez-Sandoval, Alberto Mendoza de los Santos</i>	114
La mora tropical de altura (<i>Rubus adenotrichos</i> Schltidl.) como potencial alimento funcional: una mirada a las investigaciones realizadas	
The tropical highland blackberry (<i>Rubus adenotrichos</i> Schltidl.) as a potential functional food: a look at the research carried out	
<i>Alexander Schmidt-Durán, Mario Rodríguez-Monroy, Oscar Acosta-Montoya</i>	128
Efecto de una crema elaborada con plantago mayor en un modelo murino de herida aguda de piel	
Plantago mayor based ointment effect in wound healing murine model	
<i>Silvia Castro-Piedra, Daniela Porras-Jara, Karol Jiménez-Quesada, Giovanni Garro-Monge</i>	149
Análisis comparativo de rentabilidad del cultivo de chile dulce variedad Natalie de dos invernaderos de horticultura protegida de la Región Huetar Norte	
Comparative analysis of the profitability of the cultivation of sweet pepper variety Natalie from two protected horticulture greenhouses in the Huetar Norte Region	
<i>Alfredo Alfaro-Ramos</i>	163
Zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para suelos de Costa Rica	
Geotechnical zoning using descriptive statistical parameters for Costa Rica's soils	
<i>Rafael Baltodano-Goulding</i>	172

Efecto de diferentes tensiones del agua en el suelo sobre la absorción nutricional de macroelementos en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara en ambiente protegido

Effect of different water tensions in the soil on the nutritional absorption of macroelements in the cultivation onion (*Allium cepa*) c.v. Álvara in a protected environment

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

Fecha de recepción: 28 de enero, 2023
Fecha de aprobación: 17 de mayo, 2023

Chavarría-Vidal, A; Morales-Sánchez, M; Soto-Bravo, F. Efecto de diferentes tensiones del agua en el suelo sobre la absorción nutricional de macroelementos en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.V. Álvara en ambiente protegido. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 3-16.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6428>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola. 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, Alajuela, Costa Rica. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>

Palabras clave

Absorción mineral; retención de humedad; cebolla; riego.

Resumen

La humedad en el suelo se puede estudiar de varias maneras, pero una forma fundamental es la succión con que el agua es retenida. La retención que ejerce el suelo o sustrato de suelo en su espacio poroso sobre la humedad es una representación de la cantidad de presión negativa que debe ejercer la planta por medio de sus raíces para poder succionar el agua que se encuentra en el mismo. Si esta magnitud de succión es alta, entonces puede llegar a ser restrictiva para el crecimiento de la planta. El agua que se encuentra en el espacio poroso llamada usualmente solución del suelo, no se encuentra en estado puro, sino que se encuentra normalmente en disolución y posee elementos químicos que puede o no necesitar la planta para su crecimiento y desarrollo donde al absorber dicha agua, absorbe también los elementos químicos en disolución. Por estas razones se plantaron 4 tratamientos que consistieron en mantener el suelo en ámbitos de 5 – 15 kPa (kilo pascales), 15 – 25 kPa, 25 – 35 kPa y 35 – 45 kPa de retención de agua.

Con respecto a la absorción nutricional que se presentó en el sustrato de suelo, el nitrógeno (N) y el Fósforo (P) mostraron diferencia significativa ($Pvalue < 0,05$) en los ámbitos de succión de agua en el suelo de 5 – 15 kPa, 15 - 25 kPa, 25 – 35 kPa y 35 – 45 kPa y el Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Azufre (S) mostraron diferencia significativa ($Pvalue < 0,05$) en los ámbitos de 5 – 15 kPa, 15 - 25 kPa, 25 – 35 kPa, pero no mostraron diferencia significativa ($Pvalue > 0,05$) en los ámbitos de 25 – 35 kPa y 35 – 45 kPa. Por lo anterior, se concluyó que si existe un efecto inverso del aumento de la succión de agua en el suelo en la disminución de la capacidad de absorción nutricional.

Keywords

Nutrient absorption; moisture retention; onion; irrigation.

Abstract

Moisture in the soil can be studied in several ways, but a fundamental way is the suction with which the water is retained. The retention exerted by the soil or soil substrate in its pore space on moisture is a representation of the amount of negative pressure that the plant must exert through its roots to suck the water found in it. If this magnitude of suction is high, then it can become restrictive to plant growth. The water found in the porous space, usually called soil solution, is not found in a pure state, but is normally found in solution and has chemical elements that the plant may or may not need for its growth and development, whereby absorbing said water, also absorbs the chemical elements in solution. For these reasons, 4 treatments were planted which consisted of maintaining the soil in ranges of 5 - 15 kPa, 15 - 25 kPa, 25 - 35 kPa and 35 - 45 kPa of water retention and quantifying the nutritional absorption. With respect to nutritional uptake which was present in the soil substrate, Nitrogen (N) and Phosphorus (P) showed significant difference ($Pvalue < 0,05$) in the soil water suction ranges of 5 - 15 kPa, 15 - 25 kPa, 25 - 35 kPa and 35 - 45 kPa and Potassium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) and Sulfur (S) showed significant difference ($Pvalue < 0,05$) in the 5 - 15 kPa, 15 - 25 kPa, 25 - 35 kPa ranges but showed no significant difference ($Pvalue > 0,05$) in the 25 - 35 kPa and 35 - 45 kPa ranges. Therefore, it was concluded that there is an inverse effect of the increase of water suction in the soil on the decrease of nutritional absorption capacity.

Introducción

Los suelos retienen agua de acuerdo con sus propiedades físicas y a esta característica se le llama usualmente “Capacidad de Retención de Humedad”. El agua en el suelo es retenida principalmente por los fenómenos de adhesión, cohesión, la tensión superficial y las partículas retienen el agua de acuerdo con su área específica. La fuerza resultante con que estas partículas retienen el agua se denomina potencial mátrico del agua en el suelo y se expresa en unidades de presión (MPa*10⁻¹ (megapascuales), Cb (centibares) bar (bares) y otros. El término retención de humedad o retención de agua en el suelo está íntimamente ligado a la disponibilidad de agua para las plantas [1] [2] [3].

Se han supuesto puntos característicos de retención de humedad en el suelo (cuadro 1) los cuales son los siguientes:

1. Capacidad de campo: la capacidad de campo real (CCr), es el contenido máximo de humedad que un suelo puede retener en contra de la fuerza de la gravedad y la capacidad de campo equivalente (CCe) se determina en el laboratorio y corresponde a la humedad remanente después de haber sido sometido el suelo a una succión o tensión de 0,33 MPa*10⁻¹.
2. Punto de marchitez permanente: el punto de marchitez permanente real (PMPr) representa el contenido de humedad del suelo en el cual las plantas se marchitan irreversiblemente, aunque se le aplique agua a la planta; y el punto de marchitez permanente equivalente (PMPe) se determina en el laboratorio y corresponde al contenido de humedad remanente después de haber sido sometido el suelo a una succión o tensión de 15 MPa*10⁻¹.
3. Al ámbito del contenido de humedad entre capacidad de campo real y punto de marchitez permanente real se le denomina agua útil o agua aprovechable máxima (AUm) y al ámbito entre capacidad de campo equivalente y punto de marchitez permanente equivalente se le llama agua útil equivalente. El AUm es aquella cantidad de agua máxima que pueden utilizar las plantas en el suelo y el agua útil actual (AUa) es aquella correspondiente a la diferencia entre la humedad actual que existe en el suelo y el punto de marchitez permanente [4] [5] [2] [6].

Cuadro 1. Humedad del suelo y presión de succión de agua en el suelo.

Tensión del agua en el suelo en términos de la altura de agua (cm)	Tensión del agua del suelo (MPa x10 ⁻¹)	Constantes de humedad
1	1/1000	Humedad de saturación
346	1/3	Capacidad de campo equivalente
15849	15	Punto de marchitez permanente equivalente

Tomado de: [3]

En condiciones de campo abierto se ha encontrado que la masa promedio de los bulbos de cebolla se relacionan de manera inversa con las mayores tensiones de agua en el suelo y de manera directa con las mayores láminas de riego aplicadas y se informa de un máximo de succión de agua posible en el suelo de -15 kPa [7]. También se afirma que para cultivos hortícolas cuando son irrigadas por medio del riego por goteo donde solamente se moja una fracción de suelo, el potencial matricial no debe ser menor a -40 kPa en el bulbo de riego [8].

Campos de cebolla sometidos a déficits hídricos moderados con tensiones entre -70 y -100 kPa reducen su producción de bulbos hasta un 30% y se recomienda realizar los riegos entre -7 y -15 kPa de tensión para suelos arenosos y de entre -20 y -40 kPa para suelos de texturas medias y finas [9] [10] [11]. Por otra parte, se recomienda para el cultivo de cebolla cuando se usa riego por goteo un ámbito de succión de -10 a -20 kPa donde se tiene un suelo con una condición de humedad y aireación adecuada para hortalizas altamente sensibles al déficit de agua a excepción de suelos livianos como los arenosos [12].

Sin embargo, en cultivos bajo protección de plástico se recomienda, para evitar la presencia de enfermedades fungosas y bacterianas y/o nemátodos, mantener el suelo con menor contenido de humedad y por ende, una mayor succión del agua en el suelo con tensiones máximas de -30 a -50 kPa para hortalizas sensibles [13]

La absorción de nutrientes puede ocurrir todos los días durante casi todo el ciclo de la planta o los diferentes procesos metabólicos que requieren de diferentes nutrientes tanto cualitativa como cuantitativamente en los diferentes tejidos y órganos y en las diferentes etapas de desarrollo [14] [15].

Los macroelementos más absorbidos por las plantas desde la solución del suelo son N, P, K, Ca, Mg y S y ante el cambio climático es necesario conocer el impacto que tiene la retención de agua sobre la absorción nutricional del cultivo de cebolla. Las cantidades de macronutrientes absorbidos por el cultivo de cebolla en todo su ciclo productivo son variables donde el N es de 55,6 a 154 kg ha⁻¹; P de 9,4 a 22 kg ha⁻¹; K de 78,9 a 177 kg ha⁻¹; Ca de 7,5 a 18 kg ha⁻¹; Mg de 6,3 a 18 kg ha⁻¹ y S de 34 a 48 kg ha⁻¹ [16]. Según los mismos autores manifiestan que esta variabilidad se presenta según la productividad, la variedad, tipo de suelo, luz, temperatura, presencia o disponibilidad de nutrimentos, densidad de plantas sembradas y disponibilidad de agua en el suelo.

Para una población de 320 000 plantas ha⁻¹ y una productividad de 78,9 ton ha⁻¹, al final del ciclo del cultivo 148 días después de la siembra (DDS) la cebolla cultivar 'Aquarius' extrajo 157,2 kg ha⁻¹ de N; 29,1 kg ha⁻¹ de P; 256,2 kg ha⁻¹ de K; 83,6 kg ha⁻¹ de Ca; 15,4 kg ha⁻¹ de Mg; 53,2 kg ha⁻¹ de S [17]. Para una población de 420 000 plantas ha⁻¹ y una productividad de 72 ton ha⁻¹ el híbrido de cebolla 'Optima' extrajo, al final del ciclo del cultivo (150 DDS): 61,22 kg ha⁻¹ de N; 8,74 kg ha⁻¹ de P; 106,18 kg ha⁻¹ de K; 59,45 kg ha⁻¹ de Ca; 11,56 kg ha⁻¹ de Mg y 31,55 kg ha⁻¹ de S [18].

Metodología

La metodología de esta investigación se describe con mayor amplitud en el artículo científico "Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara promedio en invernadero" (en proceso de publicación en la revista Tecnología en Marcha).

La investigación se llevó a cabo en el cantón de Alvarado, distrito Pacayas, de la provincia de Cartago; específicamente en un invernadero ubicado en 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 %. Se sembró en sustrato que se colocó en canastas de 35,0 cm de ancho; 55,0 cm de largo y 20,0 cm de alto y se llenaron con suelo franco de origen volcánico (andisol) mezclado con graba fina y arena con origen calcáreo. En las canastas se logró una altura de 20,00 a 23,00 cm para un volumen total de sustrato de 44,00 l. 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 de 4,50 meses de periodo del cultivo, para los cuales se contó con 4 tratamientos, a saber 4 diferentes ámbitos 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 (con 4 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 5 a 15 kilo Pascales (kPa).
2. Tratamiento 2 (con 3 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 15 a 25 kilo Pascales (kPa).
3. Tratamiento 3 (con 4 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 25 a 35 kilo Pascales (kPa).
4. Tratamiento 4 (con 3 repeticiones): mantenido en un ámbito de succión de 35 a 45 kilo Pascales (kPa).

Para el análisis de la absorción nutricional (kg ha^{-1}), al final del periodo del cultivo se llevaron las muestras de cada una de las repeticiones de cada tratamiento al laboratorio “Centro de Investigaciones Agronómicas” de la Universidad de Costa Rica para la estimación de las concentraciones nutricionales del cultivo de cebolla en los tejidos de hojas, raíces y bulbos.

Resultados

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes produjeron diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$) en la absorción nutricional de N como se observa en el cuadro 2.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de N (figura. 1) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 117,46 a 140,69 kg ha^{-1} , T2 (15-25) kPa de 70,85 a 97,68 kg ha^{-1} , T3 (25-35) kPa de 40,73 a 63,96 kg ha^{-1} y T4 (35-45) kPa de 9,53 a 36,36 kg ha^{-1} .

Cuadro 2: Absorción nutricional de N ($\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$) según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	129,08	13,19	A	10,22
T2 (15-25) kPa	3	84,26	12,37	B	14,68
T3 (25-35) kPa	4	52,34	8,87	C	16,95
T4 (35-45) kPa	3	22,94	3,39	D	14,78

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$)

La absorción del N presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 1) donde T2 (15-25) kPa descendió 34,72 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 37,88% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 56,17% respecto al T3 (25-35) kPa.

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$) en la absorción nutricional de P como se muestra en el cuadro 3.

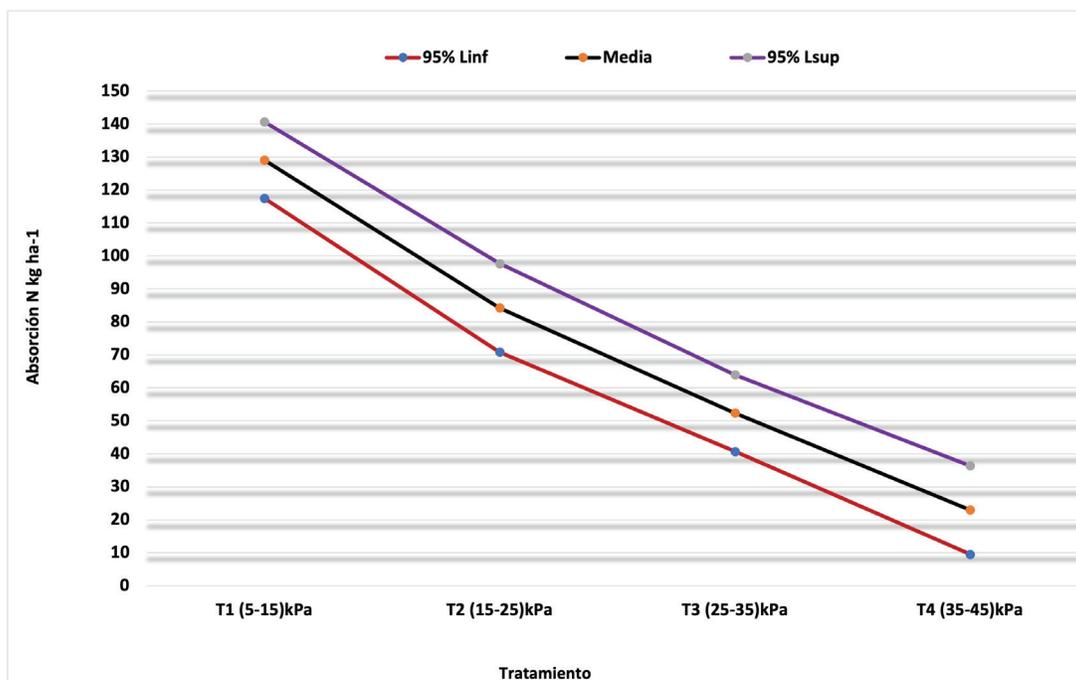


Figura 1. Absorción de N según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara

Los valores de las medias poblacionales de absorción de P (Fig. 2) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 16,10 a 19,90 kg ha⁻¹, T2 (15-25) kPa de 9,45 a 13,84 kg ha⁻¹, T3 (25-35) kPa de 5,43 a 9,23 kg ha⁻¹ y T4 (35-45) kPa de 0,48 a 4,87 kg ha⁻¹.

Cuadro 3. Absorción nutricional de P (kg ha_{efectiva}⁻¹) según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas ha_{efectiva}⁻¹).

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	18	2,82	A	15,67
T2 (15-25) kPa	3	11,643	0,491	B	4,22
T3 (25-35) kPa	4	7,329	1,252	C	17,08
T4 (35-45) kPa	3	2,671	0,225	D	8,42

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas (P-value<0,05)

La absorción del P presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 2) donde T2 (15-25) kPa descendió 35,32 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 37,05% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 63,56% respecto al T3 (25-35) kPa.

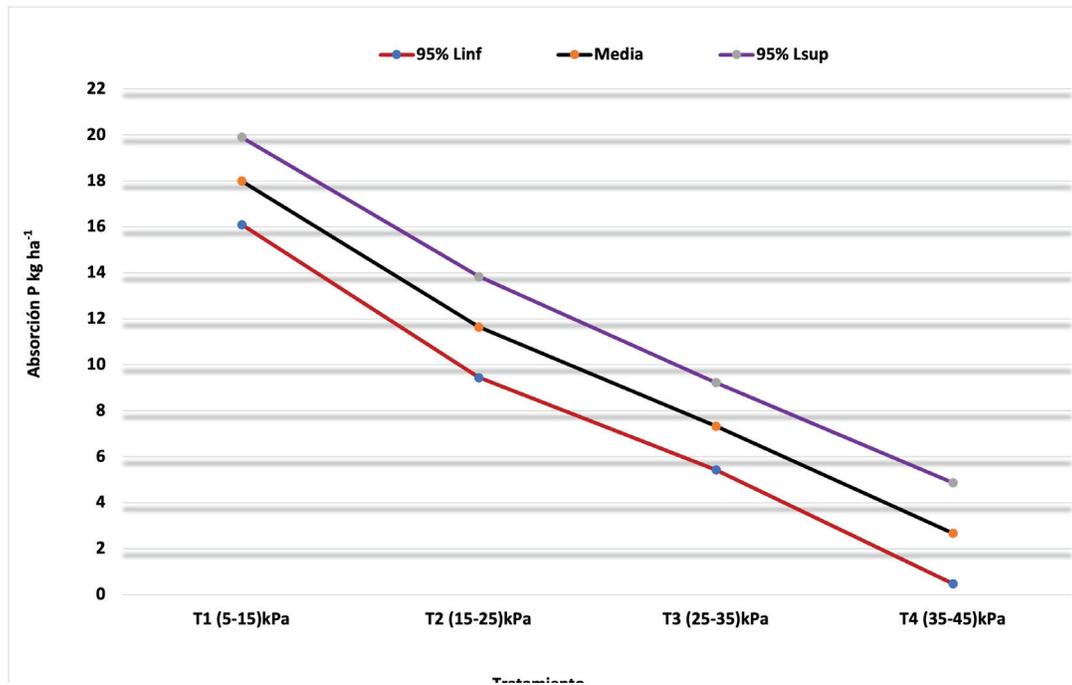


Figura 2. Absorción de P según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$) en la absorción nutricional del Ca como se muestra en el cuadro 4.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de Ca (Fig. 3) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 49,80 a 58,23 kg ha⁻¹, T2 (15-25) kPa de 28,07 a 37,81 kg ha⁻¹, T3 (25-35) kPa de 10,13 a 18,57 kg ha⁻¹ y T4 (35-45) kPa de 4,79 a 14,53 kg ha⁻¹.

La absorción del Ca presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (Fig. 3) donde T2 (15-25) kPa descendió 39,01 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 56,43% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 32,68% respecto al T3 (25-35) kPa.

Cuadro 4. Absorción nutricional de Ca (kg ha_{efectiva}⁻¹) según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas ha_{efectiva}⁻¹)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	54,01	5,61	A	10,39
T2 (15-25) kPa	3	32,94	4,16	B	12,63
T3 (25-35) kPa	4	14,35	1,732	C	12,07
T4 (35-45) kPa	3	9,66	1,626	C	16,83

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$)

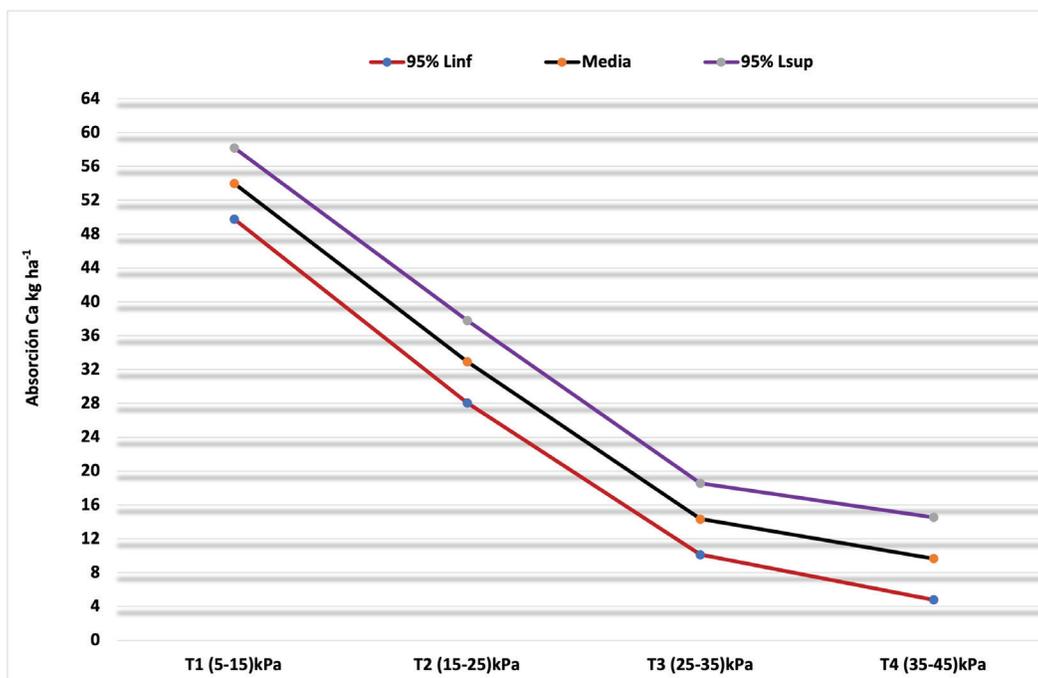


Figura 3. Absorción de Ca según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas en la absorción nutricional del Mg como se muestra en el cuadro 5.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de Mg (figura 4) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 11,38 a 14,21 kg ha⁻¹, T2 (15-25) kPa de 6,38 a 9,64 kg ha⁻¹, T3 (25-35) kPa de 2,90 a 5,73 kg ha⁻¹ y T4 (35-45) kPa de 0,58 a 3,54 kg ha⁻¹.

La absorción del Mg presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (figura 4) donde T2 (15-25) kPa descendió 37,15 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 46,16% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 48,82% respecto al T3 (25-35) kPa.

Cuadro 5. Absorción nutricional de Mg (kg ha_{efectiva}⁻¹) según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas ha_{efectiva}⁻¹)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	12,75	2,03	A	15,92
T2 (15-25) kPa	3	8,013	1,146	B	14,30
T3 (25-35) kPa	4	4,314	0,495	C	11,47
T4 (35-45) kPa	3	2,208	0,408	C	18,48

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas (P-value<0,05)

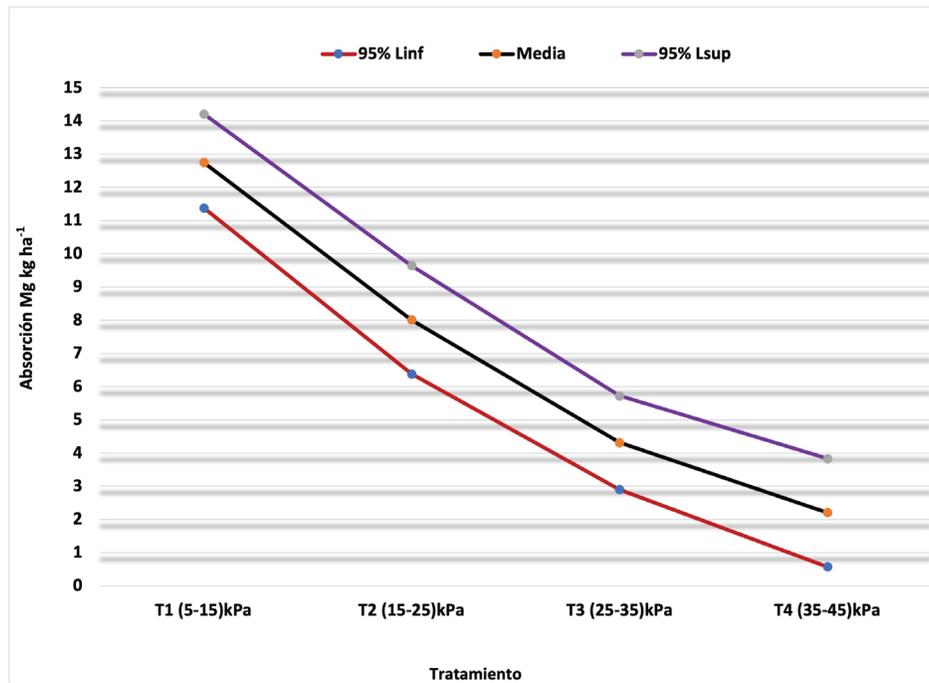


Figura 4. Absorción de Mg según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$) en la absorción nutricional del K como se muestra en el cuadro 6.

Los valores de las medias poblacionales de absorción de K (figura 5) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 133,30 a 164,4 kg ha⁻¹, T2 (15-25) kPa de 73,71 a 109,61 kg ha⁻¹, T3 (25-35) kPa de 41,02 a 72,12 kg ha⁻¹ y T4 (35-45) kPa de 8,30 a 44,20 kg ha⁻¹.

La absorción del K presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (figura 5) donde T2 (15-25) kPa descendió 38,40 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 38,28% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 53,59% respecto al T3 (25-35) kPa.

Los ámbitos de succión de agua en el suelo crecientes mostraron diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$) en la absorción nutricional del S como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 6. Absorción nutricional de K (kg ha_{efectiva}⁻¹) según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas ha_{efectiva}⁻¹).

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	148,8	20,6	A	13,84
T2 (15-25) kPa	3	91,66	16,24	B	17,72
T3 (25-35) kPa	4	56,57	6,1	C	10,78
T4 (35-45) kPa	3	26,25	4,02	C	15,31

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas ($P\text{-value} < 0,05$)

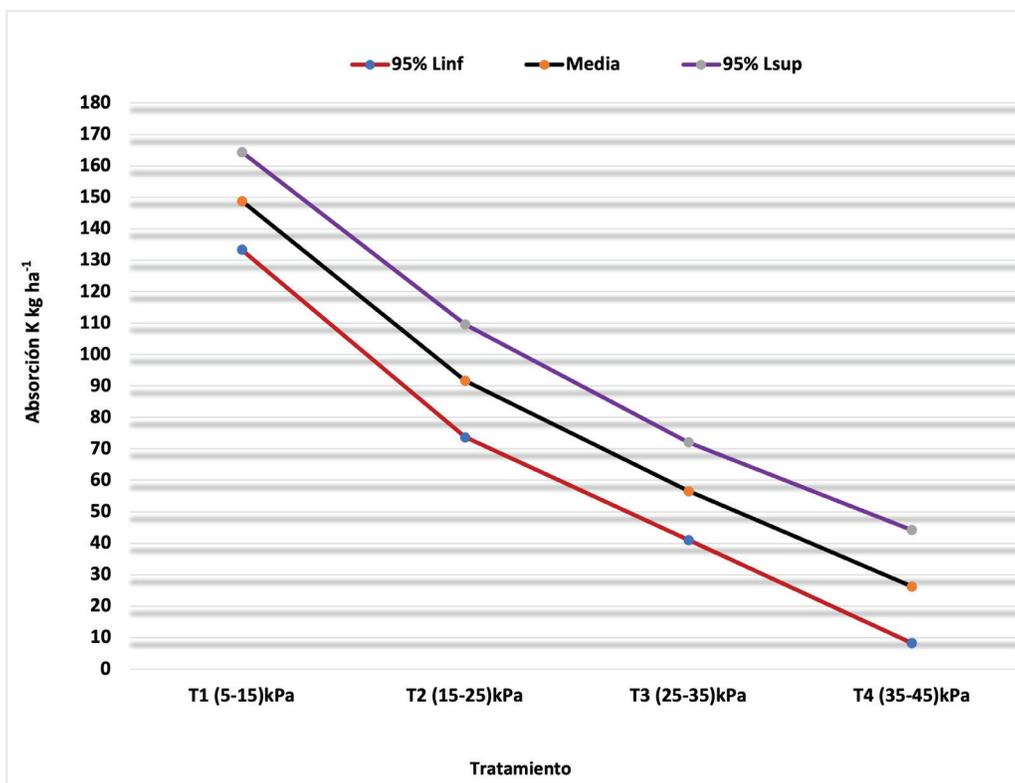


Figura 5. Absorción de K según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara

Cuadro 7. Absorción nutricional de S ($\text{kg ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$) según la succión de agua presente en el suelo (densidad 623 377 plantas $\text{ha}_{\text{efectiva}}^{-1}$)

Factor	Repeticiones	Media muestral	StDev	Significancia	%CV
T1 (5-15) kPa	4	22,68	2,32	A	10,23
T2 (15-25) kPa	3	13,24	3,07	B	23,19
T3 (25-35) kPa	4	7,78	1,53	C	19,67
T4 (35-45) kPa	3	3,61	0,674	C	18,67

Medias que no presentan igual letra muestran diferencias significativas (P-value<0,05)

La absorción del S presentó un descenso continuo conforme aumenta la succión de agua en el suelo (figura. 6) donde T2 (15-25) kPa descendió 41,62 % respecto al T1 (5-15) kPa, el T3 (25-35) kPa 41,24% respecto a T2 (15-25) kPa y el T4 (35-45) kPa 53,60% respecto al T3 (25-35) kPa.

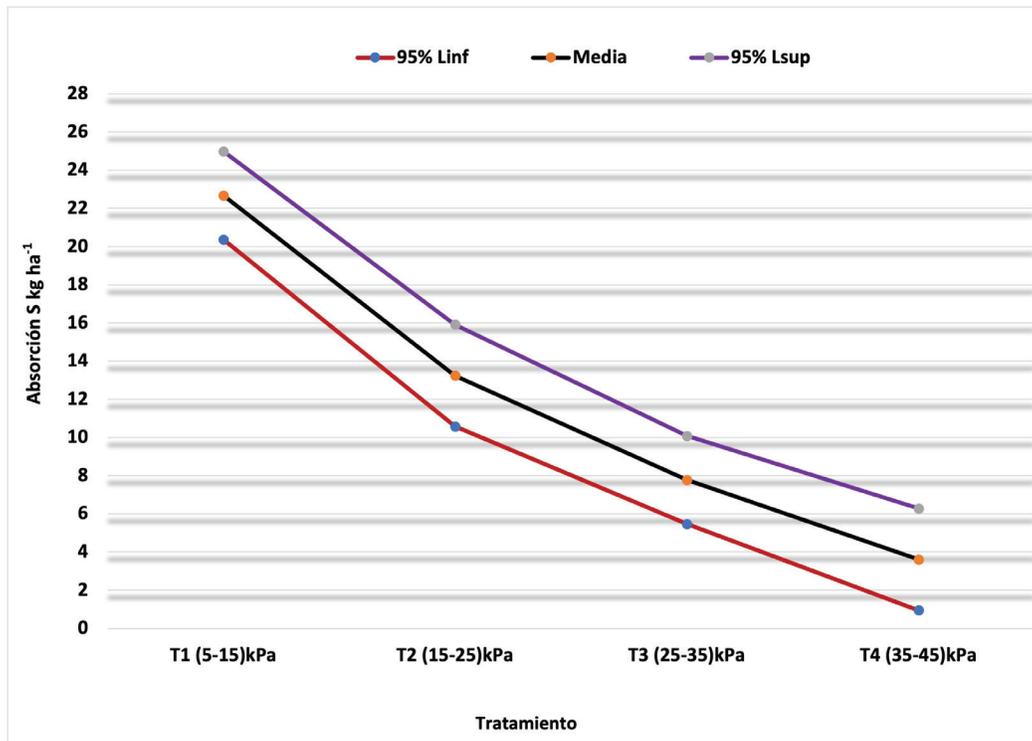


Figura 6. Absorción de S según los ámbitos de succión de humedad presente en el suelo en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara

Los valores de las medias poblacionales de absorción de S (Fig. 6) se encontraron en los siguientes ámbitos, T1 (5-15) kPa de 20,37 a 24,99 kg ha⁻¹, T2 (15-25) kPa de 10,58 a 15,91 kg ha⁻¹, T3 (25-35) kPa de 5,47 a 10,09 kg ha⁻¹ y T4 (35-45) kPa de 0,95 a 6,28 kg ha⁻¹.

La desviación con respecto a su promedio en la absorción de N, Ca, Mg y K que puede absorber el cultivo de cebolla mostró un descenso constante conforme aumentó la succión de agua en el suelo lo cual nos indica que a mayor succión la amplitud de la absorción de N, Ca, Mg y K para cada tratamiento es menor debido posiblemente a que el factor tensión de humedad se va haciendo cada vez más restrictivo conforme aumenta respecto a todos los demás factores que generan variabilidad.

Los resultados reportados por Fernandes y otros, sobre los ámbitos de macronutrientes absorbidos por el cultivo de cebolla con respecto a los resultados de la presente investigación, mostró que el N, P, K y el Mg se encuentran dentro de dichos ámbitos en los valores más bajos. El Ca fue mayor, el S fue menor a los ámbitos mencionados tomando en cuenta el número de plantas por área establecida.

Tomando en cuenta el tratamiento T1 (5 - 15) kPa que mostró mayor absorción de N, P, K, Ca, Mg y S y el número de plantas establecidas; los resultados de Moraes y otros presentó menor absorción de N en 29,61% y el P en 27,93 % y se absorbió en mayor cantidad el K en 5,91%, Ca en 63,37%, el Mg en 34,57% y el S en 106,47%. Además, los resultados de Pôrto y otros presentó que absorbió en mayor cantidad todos los macroelementos donde el N fue en 137,24%, el P en 214,94%, el K en 235,41%, el Ca en 201,53%, el Mg en 135,29% y el S en 356,95%.

En el agua que absorbe la planta por las raíces lleva los nutrimentos en solución y esa agua en su gran mayoría, es liberada de la planta por medio de los estomas en forma de vapor donde usualmente a mayor agua transpirada mayor absorción nutricional, siempre y cuando exista una buena disponibilidad de éstos.

Al verse afectada la absorción nutricional manifestado en las menores cantidades de nutrimentos absorbidos por el efecto creciente de la retención de humedad en el suelo, nos sugiere una alta posibilidad que la tasa de transpiración disminuyó y como tal, como un efecto directo en consecuencia y también con una alta posibilidad, la tasa de fotosíntesis también disminuyó.

No obstante, los ámbitos de succión de agua en el suelo de 5 – 35 kPa usualmente se han considerado como “no restrictivos” para la absorción de la solución del suelo para las plantas, pero la presente investigación encontró que en el caso del cultivo de cebolla sembrado en el sustrato-suelo, si presentó restricciones en estos ámbitos de succión de agua en el suelo.

Por otro lado, también nos indica el hecho de que las plantas posiblemente consumieron mayor energía al hacer un mayor esfuerzo para absorber la solución del suelo conforme se presentó mayor succión de agua y esto conllevó, a tener menor disponibilidad de asimilados para la formación de tejidos expresado en hojas, raíces y bulbos.

Conclusiones

La absorción de N, P, K, Ca, Mg y S en el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara presentó un efecto de disminución de absorción de cada uno de ellos debido al aumento de la succión con que es retinada el agua en el suelo (P-value < 0,05).

El tratamiento con el ámbito de menor succión T1 (5-15) kPa presentó la mayor productividad y concuerda con los valores encontrados en Brasil por la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

Capacidad de campo equivalente (cuadro 1) está ubicado en la presente investigación en el ámbito de succión de 25 – 35 kPa donde en todos los casos de los macro nutrimentos, la absorción disminuyó (P-value < 0,05) respecto al tratamiento que presentó el ámbito de menor succión T1 (5 - 15) kPa; lo cual nos indica que se debe de ajustar la tensión de agua en el suelo para procurar las mayores producciones según tipo de suelo o sustrato, variables ambientales sean estas controladas o abiertas y la variedad o hibridación del cultivo.

Agradecimientos

Se agradece a las siguientes personas físicas y jurídicas por sus aportes al desarrollo de la presente investigación.

1. Comisión de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca Alta Río Reventazón (COMCURE) (<https://sites.google.com/site/comcurecr/Home>)
2. Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) (<https://www.tec.ac.cr/>)
3. Productor Allen Aguilar Chacón
4. Fromak S. A.

Referencias

- [1] L. Rossato, *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: Dissertação de Mestrado em Meteorologia orientada pela Dra Regina Célia dos Santos*, São José dod Campos, 2001, p. 147.

- [2] R. Rojas, «Las relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera en planificación, diseño y manejo de proyectos de aguas y tierras,» (sf). [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/RASPA.PDF>. [Último acceso: 24 07 2016].
- [3] A. Chavarría, Manual de prácticas del curso Relación Suelo Agua Planta, Cartago, Cartago, 2013.
- [4] E. J. DE SOUZA, F. FRANÇA DA CUNHA, F. FAGNER MAGALHÃES, T. RAMOS DA SILVA, M. C. REZENDE ZUFFO BORGES y C. GARCIA ROQUE, «MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO NA CAPACIDADE DE CAMPO,» *Revista de Ciências Agro- Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta Ambientais, Alta Floresta Ambientais, Alta Floresta-MT*, vol. 11, nº 1, pp. 43 - 50, 2013.
- [5] A. . C. Saraiva da Costa, M. R. Nanni y E. Jeske, «DETERMINAÇÃO DA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO E PONTO DE MURCHAMENTO PERMANENTE POR DIFERENTES METODOLOGIAS,» *UNIMAR*, vol. 19, nº 3, pp. 827 - 844, 22 08 1997.
- [6] L. Santos , J. Valero, M. Picornell y J. Tarjuelo, El riego y sus tecnologías, Albacete: Europa-América, 2010.
- [7] R. Vilas Boas, G. Pereira, R. de Sousa y R. Consoni, «Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, nº 2, pp. 117 - 124, 27 04 2011.
- [8] G. Libório, S. Oliveira, C. Aragao, N. Duarte y C. Fernandes, «DESEMPENHO AGRONÔMICO DE CULTIVARES DE CEBOLA SOB DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO NO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO,» *Irriga*, vol. 18, nº 1, pp. 73 - 84, janeiro-março 2013.
- [9] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Sistemas de produção, 3: Cultivo da cebola no Nordeste, G. M. d. R. Nivaldo Duarte Costa, Ed., 2007, p. 90.
- [10] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), «Embrapa Hortaliças,» [En línea]. Available: <https://www.embrapa.br/hortalicas/cebola/como-plantar>. [Último acceso: 24 12 2019].
- [11] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola, 1ra ed., Brasilia, 2009, p. 530.
- [12] Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil, «Embrapa hortaliças: Circular técnica 57,» 2008.
- [13] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, «Circular técnica de Embrapa hortaliças,» 1997.
- [14] Azofeifa, A.; Moreira, M., *Agronomía Costarricense*, vol. 29, San José,, 2005, pp. 77 - 84.
- [15] Azofeifa, A.; Moreira, M., *Agronomía Costarricense*, vol. 31, San José, , 2008, pp. 19 - 29.
- [16] E. Fernandes, D. Fernandes, J. Silva y T. Bull, *XXXI Congreso Brasileiro de Ciência do Solo*, Río Grande del Sur, 2007, p. 4.
- [17] C. Moraes, H. de Araujo, T. Factor y L. Purquerio, «Fenologia e acumulação de nutrientes por cebola de dia curto em sementeira direta (Phenology and nutrient accumulation by short-day onion in direct seeding),» *Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal*, vol. 39, nº 2, pp. 281 - 290, Setiembre 2016.
- [18] D. Pôrto, A. Cecílio, A. May y J. Barbosa, «Acúmulo de macronutrientes pela cebola 'Optima' estabelecida por sementeira direta,» *Horticultura Brasileira*, vol. 24, nº 4, pp. 470 - 475, Octubre - Diciembre 2006.
- [19] R. Salazar-Moreno, A. Rojano-Aguilar y I. López-Cruz, «La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada,» *Tecnología y Ciencias del agua*, vol. 1, nº 2, pp. 177 - 183, 04 2014.
- [20] J. L. Ríos-Flores, M. Torres-Moreno, M. A. Torres-Moreno y J. E. Cantú Brito, «Eficiencia y productividad del cultivo de frijos en un sistema de por bombeo en Zacatecas, México,» *Ciencia Naturales y Agropecuarias*, vol. 24, nº 2, pp. 152 - 163, 10 2017.
- [21] G. Rocca da Cunha, A. Santi, A. Pasinato, G. A. Dalmago, J. L. Fernandes Pires y J. A. de Gouvêa, «Gestão da produtividade da água em agricultura: o desafio de elevar o rendimento dos cultivos em ambientes com restrição hídrica,» *Plantio Direto*, vol. 144, pp. 27 - 31, S.f.
- [22] V. P. da S. Paz, J. A. Frizzone, T. A. Botrel y M. V. Folegatti, «Otimização do uso da água em sistemas de irrigação por aspersão,» *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 6, nº 3, pp. 404 - 408, 2002.
- [23] R. da Costa Ferreira, *Universidade Federal de Campin Grande: Programa de Pós- graduação em Meteorologia*, Campina Grande, Paraíba, 2014.
- [24] E. de Oliveira Feitosa, A. F. Batista Araújo, F. Bezerra Lopes, E. Maia Andrade y F. M. Lima Bezerra, «ANÁLISE DE CUSTOS E RENTABILIDADE NA PRODUÇÃO DE MAMÃO IRRIGADO NO SEMIÁRIDO,» *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, vol. 12, nº 1, pp. 2293 - 2304, 01 - 02 2018.

- [25] F. González Robaina, J. Herrera Puebla, T. López Seijas y G. Cid Lazo, «Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba,» *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 23, nº 4, pp. 21 - 27, 12 2014.
- [26] Instituto Nacional de Meteorología (INMET), *Agrometeorología dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*, Brasília - DF, 2009, p. 530.
- [27] R. Testezlaf, *Universidade Estadual de Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola.*, São Paulo, Sf..
- [28] E. d. J. Montenegro-Hernández, Cartago, Cartago, 2018, p. 507.

Evaluación de TiO_2 sensibilizado con tintes de trímeros de cobalto como fotocatalizador para la producción de hidrógeno a partir de la separación de agua

Evaluation of TiO_2 sensitized with cobalt trimer dyes as photocatalyst for water-splitting hydrogen production

Daniela Camacho-Ureña¹, Leslie W. Pineda²,
J. Esteban Durán-Herrera³

Fecha de recepción: 7 de marzo, 2023
Fecha de aprobación: 11 de junio, 2023

Camacho-Ureña, D; Pineda, L.W; Durán-Herrera, J.E. Evaluación de TiO_2 sensibilizado con tintes de trímeros de cobalto como fotocatalizador para la producción de hidrógeno a partir de la separación de agua. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 17-26.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6472>

- 1 Escuela de Ingeniería Química, Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: [danitis71@gmail.com](mailto:dانيتis71@gmail.com)
<https://orcid.org/0000-0002-4632-4137>
- 2 Escuela de Química, Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: leslie.pineda@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-3778-6185>
- 3 Escuela de Ingeniería Química, Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: esteban.duranherrera@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7382-0454>

Palabras clave

Hidrógeno; dióxido de titanio; trímeros de cobalto; fotocatalisis; separación del agua.

Resumen

En esta investigación se sintetizaron fotocatalizadores de TiO_2 basados en la funcionalización de su superficie con moléculas orgánicas (glicina y ácido aminocaproico) y un trímero de cobalto en su forma molecular $[\text{Co}_3(\text{dpa})_4\text{Cl}_2]$, ($\text{dpa}=2,2'$ -dipiridilamina), utilizando dos métodos de calentamiento (reflujo y microondas) para realizar las respectivas reacciones de anclaje. Estos fotocatalizadores fueron evaluados en su capacidad de producción de hidrógeno a partir de la reacción de separación del agua, utilizando una lámpara de Hg de mediana presión (125 W) y metanol como agente de sacrificio. Además, para fines de comparación, también se sintetizaron y evaluaron fotocatalizadores de CuO-TiO_2 y CoO-TiO_2 . El fotocatalizador que presentó el mejor rendimiento fue el catalizador de TiO_2 sensibilizado con el trímero de cobalto con glicina como molécula de anclaje, preparado utilizando calentamiento por microondas, el cual generó hidrógeno a una tasa promedio de $1887 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Se observó que la longitud de la cadena de la molécula de anclaje tiene un efecto sobre la actividad fotocatalítica, conforme aumenta el largo de la cadena, la producción de hidrógeno disminuye. Además, que el método de calentamiento por microondas es el que produce catalizadores con mejores resultados en la generación de hidrógeno.

Keywords

Hydrogen; titanium dioxide; cobalt trimers; photocatalysis; water splitting.

Abstract

In this research, sensitized TiO_2 photocatalysts were synthesized based on the functionalization of their surface with organic molecules (glycine and aminocaproic acid) and a cobalt trimer in its molecular form $[\text{Co}_3(\text{dpa})_4\text{Cl}_2]$, ($\text{dpa} = 2,2'$ -dipyridylamine), using two different heating methods (reflux and microwave) to carry out the anchoring reactions. The capacities of the photocatalysts for producing hydrogen from the water-splitting reaction were evaluated using a medium-pressure Hg lamp (125 W) and methanol as a sacrificial agent. Also, CuO-TiO_2 and CoO-TiO_2 photocatalysts were synthesized and evaluated for comparison purposes. The photocatalyst that presented the best performance was TiO_2 sensitized with the cobalt trimer, using glycine as an anchoring molecule, and prepared with microwave heating; this photocatalyst generated hydrogen at an average rate of $1887 \text{ mmol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$. It was observed that the chain length of the anchoring molecule affects the photocatalytic activity, as the chain length increases, the production of hydrogen decreases. Last, microwave heating produced the photocatalyst with the best performance on hydrogen generation.

Introducción

Durante muchos años, los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural han sido la fuente principal de energía para la producción industrial, calefacción, transporte, entre otros. La inclusión de nuevas fuentes de energía renovables ha sido mínima, principalmente debido al alto costo e insuficiente desarrollo de estas tecnologías. Sin embargo, la concienciación de los efectos ambientales dañinos que genera la excesiva dependencia de los combustibles

fósiles, la preocupación cada vez mayor por la disponibilidad de algunos de estos combustibles y la creciente demanda de energía a nivel mundial, han aumentado el interés en modificar y diversificar a fuentes de energía menos contaminantes [1].

El hidrógeno es considerado por muchos el combustible del futuro, el cual sería capaz de contribuir significativamente en el reemplazo de los combustibles fósiles, la disminución de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y con ello, el calentamiento global. No obstante, en la actualidad, aproximadamente el 96% del hidrógeno producido en el mundo se obtiene del proceso de reformado de gas natural con vapor de agua y de la gasificación de coque [2], procesos que dependen de combustibles fósiles y de igual forma producen gases de efecto invernadero. Por lo tanto, desarrollar procesos renovables para la producción de hidrógeno se convierte en uno de los principales desafíos tecnológicos en la actualidad, siendo el proceso de generación de hidrógeno a partir de la separación del agua mediante el uso de energía solar uno de los más estudiados [3].

De acuerdo con publicaciones realizadas en los últimos años, la fotocatalisis, con su potencial de utilizar la luz solar para generar hidrógeno, representa una de las tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente más prometedoras para realizar este proceso [3]-[6]. La fotocatalisis utiliza materiales semiconductores que a diferencia de otras tecnologías renovables de producción de combustibles, posee la ventaja de operar a condiciones ambientales, sin requerimientos complejos de transformación [7].

La estructura electrónica de un semiconductor juega un papel clave en la fotocatalisis. A diferencia de un conductor, un semiconductor consiste de una banda de valencia (BV) y una banda de conducción (BC). La diferencia de energía entre estos dos niveles es conocida como banda prohibida. Sin excitación, los electrones se encuentran en la BV, pero cuando los semiconductores son excitados por fotones con energía igual o superior al nivel de energía de la banda prohibida, los electrones son trasladados de la BV a la BC dejando un hueco de carga positiva en la BV. Los electrones y huecos fotogenerados pueden recombinarse tanto en el seno como en la superficie del semiconductor en un tiempo muy corto, liberando energía en forma de calor o fotones; los electrones y huecos que migren hacia la superficie del semiconductor sin recombinarse, pueden inducir reacciones de reducción y oxidación, respectivamente. Para la producción de hidrógeno a partir de la separación del agua vía fotocatalisis, el nivel de la BC debe ser más negativo que el nivel de producción de hidrógeno mientras que el de la BV debe ser más positivo que el nivel de oxidación del agua [8].

El semiconductor más estudiado como fotocatalizador para este proceso ha sido el TiO_2 ; sin embargo, este presenta la desventaja que requiere, debido al valor de su banda prohibida, luz ultravioleta para la excitación de sus electrones. Por esta razón, se han desarrollado técnicas de modificación de los fotocatalizadores para propiciar el mejoramiento de la producción de hidrógeno utilizando radiación solar, entre ellas, el dopaje y la sensibilización son ampliamente utilizadas, ya que estas favorecen tanto la separación de los pares electrón/hueco como la inyección de electrones a la partícula del TiO_2 [9]-[10].

En esta investigación se sintetizaron fotocatalizadores de TiO_2 basados en la funcionalización de su superficie con moléculas orgánicas (glicina y ácido aminocaproico) y un trímero de cobalto en su forma molecular $[\text{Co}_3(\text{dpa})_4\text{Cl}_2]$, donde dpa = 2,2'-dipiridilamina, utilizando dos métodos de calentamiento (reflujo y microondas). Estos fotocatalizadores fueron evaluados en su capacidad de producción de hidrógeno a partir de la reacción de separación del agua utilizando una lámpara de Hg de mediana presión.

Materiales y métodos

Materiales

Todas las sustancias químicas utilizadas fueron de grado reactivo y el agua destilada. Se utilizó TiO_2 en forma de anatasa nanoparticulado (Sigma-Aldrich) como fotocatalizador de base y como agente de sacrificio se usó metanol (Fisher Scientific).

Preparación de los fotocatalizadores

Se preparó TiO_2 -CuO como fotocatalizador de referencia para su comparación con los otros fotocatalizadores, ya que éste ha sido anteriormente investigado y sus resultados han sido reportados ampliamente en la literatura [11]-[14]. Este fotocatalizador se preparó por medio de una impregnación húmeda convencional seguida de calcinación, lo anterior según la metodología descrita por Xu et al. [11] y Yu et al. [12]. En breve, el TiO_2 se trató térmicamente por 4 h a una temperatura de 500 °C, esto con el fin de aumentar la cristalinidad del compuesto y hacerlo más activo. Se agregó 1,0 g del TiO_2 en 80 mL de agua destilada y 35 mL de una disolución acuosa de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (0,05 M); se sonificó por 15 min y se dejó en agitación por 2 h. Seguidamente se filtró al vacío y se calcinó en aire a una temperatura de 350 °C por 4 h. Con este procedimiento la cantidad de cobre que se obtuvo en el fotocatalizador fue de 1,3 % m/m (determinado mediante espectroscopia de absorción atómica con llama).

El resto de los fotocatalizadores sintetizados son TiO_2 funcionalizado con moléculas orgánicas y trímeros de cobalto, los cuales se sintetizaron mediante un anclaje molecular de dos pasos: primero se ancla la molécula orgánica (glicina o ácido 6-aminocaproico) a la superficie del TiO_2 y luego se adiciona el trímero de cobalto [$\text{Co}_3(\text{dpa})_4\text{Cl}_2$] a la molécula orgánica previamente anclada. En la figura 1 se muestran las estructuras químicas de cada uno de los dos fotocatalizadores de TiO_2 sensibilizado sintetizados.

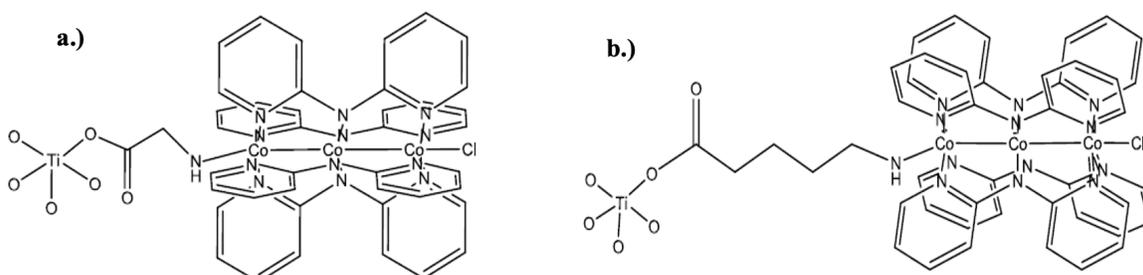


Figura 1. Estructuras químicas de TiO_2 sensibilizado con trímero de cobalto usando como molécula de anclaje a.) glicina y b.) ácido 6-aminocaproico.

En primer lugar, se sintetizó el trímero de cobalto de acuerdo con la metodología descrita por Rivera [15], en la cual se parte de CoCl_2 anhidro, 2,2'-dipiridilamina y tetrahidrofurano (THF). Seguidamente se realizó la modificación del TiO_2 con las moléculas de anclaje (glicina y ácido 6-aminocaproico) utilizando dos métodos de calentamiento diferentes, por reflujo y por microondas, para fines de comparación. Para ello se preparó una disolución del compuesto orgánico (5 mL, 10 % m/m) en metanol y se mezcló con el TiO_2 (0,3 g). En el caso de calentamiento por reflujo se calentó por 18 h con agitación constante y para el caso del microondas, la reacción se realizó a 80 °C por un tiempo de 7 min con potencia del microondas de 150 W y agitación alta. Por último, se realizó la adición del trímero de cobalto para lo cual se preparó una disolución del trímero de cobalto en THF (0,5 g en 90 mL) y se le agregó el TiO_2

modificado con las moléculas de anclaje (0,3 g). De igual forma, la suspensión se somete dos procesos de calentamiento diferentes, para el caso de reflujo, la suspensión se calentó por 18 h, mientras que con el microondas, la suspensión se hace reaccionar a las siguientes condiciones: 90 °C, 12 min, potencia 150 W y agitación alta.

También se preparó CoO-TiO₂ para comparar su desempeño, para lo cual simplemente se calcina, a 300 °C, uno de los fotocatalizadores de TiO₂ sensibilizado preparados. En el cuadro 1 se presenta el porcentaje de cobre medido por Rivera [15] para cada uno de los fotocatalizadores evaluados.

Cuadro 1. Porcentaje de Co medido en cada uno de los fotocatalizadores evaluados [15].

Muestra	Porcentaje de Co (% m/m)
TiO ₂ + glicina + trímero de Co (reflujo)	1,190
TiO ₂ + glicina + trímero de Co (mw)	0,104
TiO ₂ + ácido 6-aminocaproico + trímero de Co (reflujo)	1,040
TiO ₂ + ácido 6-aminocaproico + trímero de Co (mw)	0,027
TiO ₂ - CoO	3,078

Producción fotocatalítica de hidrógeno

La producción fotocatalítica de hidrógeno se llevó a cabo en un fotorreactor con pozo de inmersión de doble pared de cuarzo con una capacidad de 425 mL (SAIC, QW2 + B/400). Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente y presión atmosférica y como medio de irradiación se utilizó una lámpara de Hg de mediana presión de 125 W (SAIC, MVL 3). Para mantener la temperatura constante dentro del reactor, se hizo circular agua del grifo por la chaqueta de enfriamiento. Los gases producidos durante la reacción eran recolectados y cuantificados en una bureta con sello de agua, la cual se mantenía a presión atmosférica.

En un experimento típico de fotocatalisis, 0,3 g del fotocatalizador se agregaron a 300 mL de una disolución de metanol/agua (10% v/v). Antes de empezar la irradiación, la suspensión del fotocatalizador se dispersó a través de un proceso ultrasónico por 10 min y después se burbujeó nitrógeno a través del reactor por 20 min para remover el oxígeno disuelto. Para mantener la suspensión homogénea durante la reacción, se utilizó agitación magnética en el fondo del reactor. Una vez iniciada la reacción, aproximadamente cada 30 min se tomó una muestra de 300 mL del gas producido y se analizó mediante cromatografía de gases. El método cromatográfico programado para llevar a cabo la determinación de los gases es el siguiente: columna Supelco Carboxen-1010 Plot (30 m x 0,53 mm I.D), detector TCD, horno a 100 °C por 4 min y luego se calienta hasta 230 °C a 15 °C/min, temperatura de inyección 200 °C, temperatura del detector 230 °C, gas de arrastre nitrógeno a 4,0 mL/min.

Resultados

Previo a iniciar la evaluación de los diferentes fotocatalizadores sintetizados, se realizaron pruebas de control para determinar los elementos necesarios para que la reacción de separación fotocatalítica del agua se produzca. En experimentos en los que se combinaron únicamente agua destilada y la fuente de radiación (sin catalizador) o agua destilada y el catalizador (sin

la lámpara), no se presentó una producción cuantificable de hidrógeno u otro gas. En estas pruebas se demostró que era necesario combinar el agua destilada, el fotocatalizador, la fuente de radiación para poder producir hidrógeno.

Se realizaron algunas pruebas con el catalizador de TiO_2 (anatasa) y CuO-TiO_2 , cuyos resultados se presentan en el cuadro 2. Se puede observar que al utilizar únicamente el TiO_2 , no se obtuvo generación de hidrógeno, mientras que al usar el CuO-TiO_2 sí se produce la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno, lo que evidencia el efecto co-catalizador del CuO en la actividad fotocatalítica. Cuando el catalizador se somete a radiación, tanto el TiO_2 como el CuO se activan al mismo tiempo, por lo que, durante el proceso fotocatalítico, los electrones fotogenerados se transfieren de la banda de conducción del TiO_2 hacia las agrupaciones de CuO y se acumulan en sus bandas de conducción más bajas, mientras que los huecos se acumulan en la banda de valencia del TiO_2 y CuO ; como consecuencia, los electrones fotogenerados en las agrupaciones del CuO pueden efectivamente reducir el H^+ para producir H_2 .

Cuadro 2. Producción promedio de hidrógeno obtenida con los catalizadores de TiO_2 (anatasa) y CuO-TiO_2 .

Sistema	Producción de hidrógeno ($\mu\text{mol h}^{-1} \text{g}_{\text{cat}}^{-1}$)
TiO_2 suspendido en agua destilada	No cuantificable
CuO-TiO_2 suspendido en agua destilada	46
CuO-TiO_2 suspendido en solución de metanol al 10 % v/v	155

De los resultados reportados en el cuadro 2 también se puede observar que al llevarse a cabo la reacción en presencia de metanol como agente de sacrificio, se obtuvo una producción 3,20 veces mayor de hidrógeno. En la separación del agua mediante fotocatalisis, la oxidación del agua por medio de los huecos es un proceso mucho más lento que la reducción por parte de los electrones; usualmente, los agentes de sacrificio son introducidos para facilitar el proceso de oxidación, especialmente para prevenir el proceso de recombinación de ambos, electrón y el hueco. Se han realizado varias investigaciones acerca del tipo de alcohol que mejor desempeño tiene como agente de sacrificio en la actividad fotocatalítica. De acuerdo con Sreethawong et al. [16], entre una serie de alcoholes estudiados, se encontró que el metanol era el más eficaz y más fuerte durante la producción de H_2 . Lo anterior se debe a que compuestos con polaridades más altas, como ácidos y cetonas, son incapaces de suprimir eficientemente la recombinación electrón-hueco, probablemente debido a que su configuración electrónica es más estable.

El cuadro 3 presenta los resultados de producción promedio de H_2 obtenidos utilizando los fotocatalizadores de TiO_2 sensibilizados con el trímero de cobalto y las dos moléculas orgánicas de anclaje, para cada método de calentamiento utilizado. Según estos resultados, se puede observar que el tamaño en la molécula orgánica de anclaje tiene un efecto sobre la producción de H_2 , conforme aumenta el largo de la cadena, la producción de H_2 disminuye. Claramente puede verse que en el caso de la glicina se obtienen mejores resultados de producción de H_2 que con el ácido 6-aminocaproico; por ejemplo, la generación aumentó 2,5 veces para el caso en el que se utilizó el método de calentamiento por microondas. Una de las posibles causas de este comportamiento es que el ácido 6-aminocaproico al ser una molécula más larga podría bloquear de forma parcial los sitios activos del TiO_2 , permitiendo un aumento en la opacidad y dispersión de la luz, dando lugar a una disminución del paso de irradiación a través de la solución en suspensión [12]. El objetivo de la sensibilización del TiO_2 es que bajo iluminación con luz visible, el trímero de cobalto se excite y con esto inyecte electrones extra hacia la banda de conducción de TiO_2 . Por lo tanto, otra de las posibles razones por las cuales se observa

diferencia en la generación de H_2 entre las dos moléculas ancladas es que, al extenderse la cadena de átomos de carbono, es más difícil para estos electrones generados llegar a la partícula del TiO_2 .

Cuadro 3. Producción fotocatalítica promedio de H_2 obtenidas con los fotocatalizadores de TiO_2 sensibilizado en una disolución metanol/agua a una concentración de 10 % v/v.

Fotocatalizador	Método de calentamiento	
	Microondas ($mmol\ h^{-1}\ g^{-1}$)	Reflujo ($mmol\ h^{-1}\ g^{-1}$)
TiO_2 -Glicina-Trímero de Co	1887	340
TiO_2 -Ácido 6-aminocaproico-Trímero de Co	757	176

De la misma manera se observa que el método de calentamiento utilizado en el proceso de síntesis de los fotocatalizadores es una variable que afecta la generación de H_2 , siendo el calentamiento por microondas el que genera los catalizadores con mayor actividad. El método de calentamiento por reflujo es una técnica que utiliza un disolvente a ebullición, el cual proporciona altas temperaturas y en la que se desea mantener un volumen constante en la reacción. Este método de calentamiento tradicional se da por medio de conducción desde una fuente externa de calor (en este caso por una plantilla), por lo que el calor es conducido a la sustancia pasando primero a través de las paredes del recipiente para que llegue al disolvente y finalmente a los reactivos. Por el contrario, en la síntesis por microondas se produce un calentamiento molecular, es decir, la transferencia de energía se da directamente a las especies reactivas, por lo que fomenta transformaciones que no serían posibles con calentamiento convencional. Las microondas se acoplan directamente con las moléculas que están presentes en la mezcla de reacción, permitiendo una rápida elevación de la temperatura. Los resultados del análisis termogravimétrico de estos fotocatalizadores realizados por Rivera [15] muestran que se alcanza una mayor eficiencia en el proceso de funcionalización de la glicina y del ácido aminocaproico a través del calentamiento por microondas.

De igual forma, si se comparan los porcentajes de cobalto que se muestran en el cuadro 1, se observa que la cantidad de cobalto para las muestras sintetizadas mediante el calentamiento por reflujo es mayor. Lo anterior se refleja en la coloración intensa de los fotocatalizadores sintetizados por medio de este calentamiento. De acuerdo con los resultados obtenidos, el contenido de cobalto en la muestra afecta la producción de H_2 y conforme aumenta este porcentaje, disminuye la actividad fotocatalítica. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos por Xiao et al. [17], en donde reportan que la presencia de Co_3O_4 incrementa la actividad fotocatalítica. Sin embargo, el contenido de cobalto en las muestras analizadas disminuye la actividad, en el siguiente orden: 0,2% > 0,4% > 0,6% > 0% > 0,8% > 1%, obteniendo un mejor desempeño la muestra que contenía 0,2 wt% de Co_3O_4 . Han et al. [18] reportaron un resultado similar con el siguiente orden de concentraciones de Co_3O_4 con g- C_3N_4 : 0,2% > 0,5% > 0,8% > 1,0% > 0,1% > 0% > 1,5% > 2,0%, comentando que la actividad fotocatalítica decrece al incrementar la concentración.

El fotocatalizador de TiO_2 -CoO se probó con la intención de comparar el desempeño del cobalto como co-catalizador en forma de óxido o en el trímero. En la figura 2 se observa la evolución de H_2 obtenida con el TiO_2 -CoO y el TiO_2 -glicina-trímero de cobalto preparado con microondas. Para el caso del fotocatalizador TiO_2 -CoO se alcanzó una producción de hidrógeno de 6148 $\mu mol\ g^{-1}$ en un tiempo aproximado de 6 h, mientras que con el trímero fue de 11 170 $\mu mol\ g^{-1}$.

Además, se puede observar que para el $\text{TiO}_2\text{-CoO}$ la producción fue baja en las primeras 4 h y luego aumentó, mientras que para el trímero de cobalto la producción fue bastante constante en el tiempo.

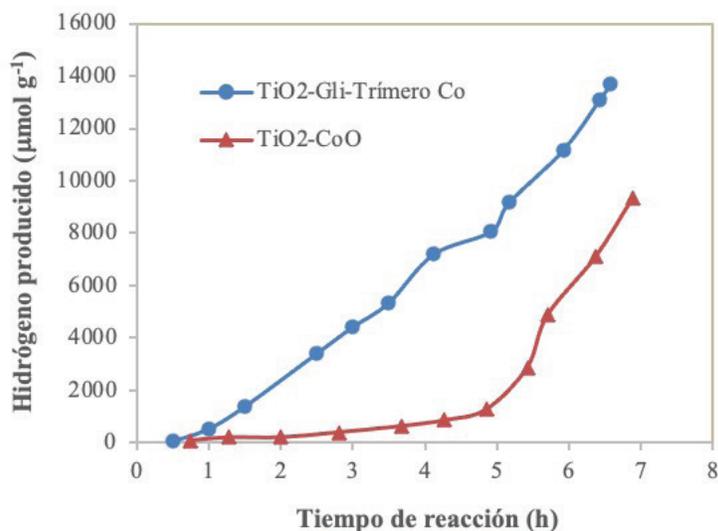


Figura 2. Evolución de H_2 obtenida con $\text{TiO}_2\text{-CoO}$ y $\text{TiO}_2\text{-glicina-trímero de cobalto}$ preparado con microondas en una disolución metanol/agua a una concentración de 10% v/v.

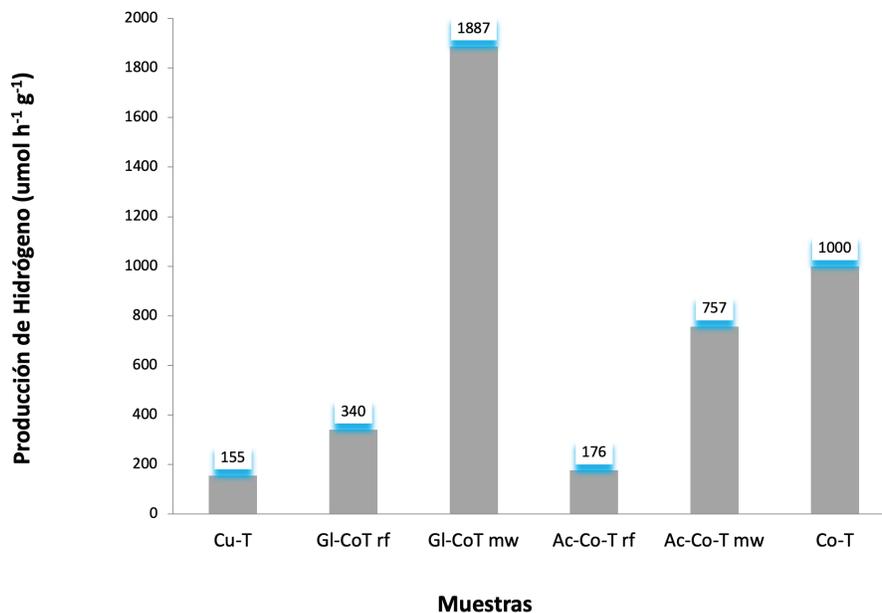


Figura 3. Comparación entre la actividad fotocatalítica del CuO-TiO_2 , $\text{TiO}_2\text{-Glicina-Trímero de Co}$ por reflujo, $\text{TiO}_2\text{-Glicina-Trímero de Co}$ por microondas, $\text{TiO}_2\text{-Ácido 6-aminocaproico-Trímero de Co}$ por reflujo, $\text{TiO}_2\text{-Ácido 6-aminocaproico-Trímero de Co}$ por microondas y CoO-TiO_2 , suspendidos en una disolución de metanol/agua al 10% v/v.

Como se puede observar en la figura 3, de manera global, el fotocatalizador con el mejor desempeño para la producción de hidrógeno fue el trímero de cobalto con la glicina funcionalizada a la superficie del dióxido de titanio utilizando el microondas como método

de calentamiento durante la síntesis. Por otro lado, el CuO anclado al dióxido de titanio es la muestra que presenta el rendimiento más bajo. Tanto el CuO como el trímero de cobalto son poliatómicos; sin embargo, la primera diferencia que se observa es con respecto a las nuclearidades de ambos compuestos. Por un lado, el CuO-TiO₂ tiene un solo átomo de cobre mientras que el trímero está formado por tres átomos de cobalto. El cobre no tiene acceso a los estados de oxidación que presenta cada átomo el cobalto, por lo tanto, su facilidad para la transferencia de electrones no se ve favorecida. De ahí que la presencia del óxido de cobalto (II) como co-catalizador incrementa la producción de H₂ en comparación con el óxido de cobre (II). Además, el trímero de Co se ha anclado a la superficie del TiO₂ de manera lineal (Co-Co-Co) y en su forma molecular. Mientras más átomos de cobalto estén anclados a la partícula de TiO₂, la capacidad de captar fotones es mucho más intensa, lo cual genera un gradiente electrónico. Esto permite canalizar la luz e inyectar los electrones a la banda de conducción de la partícula del TiO₂ produciendo una actividad favorable en la producción de H₂ ya que se crea una forma más controlada, desde el punto de vista molecular, de modular esta transferencia de electrones.

Conclusiones

- El catalizador con mejor desempeño para la producción de H₂ mediante fotocátalisis fue el trímero de cobalto con la glicina funcionalizada a la superficie del dióxido de titanio utilizando el microondas como método de calentamiento, obteniéndose una generación promedio de 1887 mmol g⁻¹ h⁻¹.
- Se logró comprobar que la presencia del trímero de cobalto en el fotocatalizador incrementa considerablemente la actividad fotocatalítica en la producción de hidrógeno.
- Se determinó que la longitud de la cadena de la molécula de anclaje tiene un efecto sobre la actividad fotocatalítica, conforme aumenta el largo de la cadena de esta cadena, la producción de H₂ disminuye.
- Se observó que el método de calentamiento por microondas es el que produce catalizadores con mejores resultados en la generación de H₂.
- El contenido de cobalto en la muestra afecta la producción de hidrógeno, conforme este porcentaje aumenta, disminuye la actividad fotocatalítica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ) y de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] A. Ochs, A. Dolezal, A. Majano, R. Palencia. (2013). *The way forward for renewable energy in Central America*, Worldwatch Institute. [En línea] Disponible en: https://cdkn.org/wp-content/uploads/2013/04/The-Way-Forward-for-Renewable-Energy-in-Central-America_english_FINAL.pdf
- [2] World Energy Council. (2019). *New Hydrogen Economy: Hope or Hype?*, World Energy Council. [En línea] Disponible en: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WElights-Brief-New-Hydrogen-economy-Hype-or-Hope-ExecSum.pdf>.
- [3] S. Dutta. "Review on Solar Hydrogen: Its Prospects and Limitations", *Energy & Fuels*, 35, pp. 11613–11639, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00823>
- [4] S. Z. Baykara. "Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, pp. 10605–10614, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.022>

- [5] A. A. Ismail, D. W. Bahnemann, "Photochemical splitting of water for hydrogen production by photocatalysis: A review", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 128, pp. 85-101, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.04.037>
- [6] L. Sun, L. Han, J. Huang, X. Luo, X. Li, "Single-atom catalysts for photocatalytic hydrogen evolution: A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 40, pp. 17583-17599, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.259>
- [7] R. Ameta, M. S. Solanki, S. Benjamin, S. C. Ameta, "Photocatalysis" in *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*, Academic Press, 2018, ch. 6, pp. 135-175. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-810499-6.00006-1>
- [8] T. Hisatomi, J. Kubota, K. Domen, "Recent advances in semiconductors for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting", *Chem. Soc. Rev.*, 43, pp. 7520-7535, 2014. <https://doi.org/10.1039/c3cs60378d>
- [9] M. Nasirian, Y. P. Lin, C. F. Bustillo-Lecompte, M. Mehrvar, "Enhancement of photocatalytic activity of titanium dioxide using non-metal doping methods under visible light: a review", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15, pp. 2009-2032, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1618-2>
- [10] M. Ismael, "Latest progress on the key operating parameters affecting the photocatalytic activity of TiO₂-based photocatalysts for hydrogen fuel production: A comprehensive review", *Fuel*, 303, pp. 121207, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121207>
- [11] S. Xu, D. D. Sun. "Significant improvement of photocatalytic hydrogen generation rate over TiO₂ with deposited CuO", *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, pp. 6096-6104, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.119>
- [12] J. Yu, Y. Hai, M. Jaroniec, "Photocatalytic hydrogen production over CuO-modified titania", *Journal of Colloid and Interface Science*, 357, pp. 223-228, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.01.101>
- [13] Y. Liu, Z. Wang, W. Huang, "Influences of TiO₂ phase structures on the structures and photocatalytic hydrogen production of CuOx/TiO₂ photocatalysts", *Applied Surface Science*, 389, pp. 760-767, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.173>
- [14] Y. Liu, Z. Ye, D. Li, M. Wang, Y. Zhang, W. Huang, "Tuning CuOx-TiO₂ interaction and photocatalytic hydrogen production of CuOx/TiO₂ photocatalysts via TiO₂ morphology engineering", *Applied Surface Science*, 473, pp. 500-510, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.177>
- [15] C. Rivera, "Funcionalización de dióxido de titanio nanoparticulado con diferentes moléculas orgánicas bifuncionales y trímeros de compuestos de transición para la obtención de nuevos materiales", Tesis de Maestría, Escuela de Química, Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2012.
- [16] T. Sreethawong, T. Puangpetch, T. Chavadej, T. Yoshikawa, "Quantifying influence of operational parameters on photocatalytic H₂ evolution over Pt-loaded nanocrystalline mesoporous TiO₂ prepared by single-step sol-gel process with surfactant template", *Journal of Power Sources*, 165, pp. 861-869, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.050>
- [17] Q. Xiao, J. Zhang, C. Xiao, X. Tan, "Photocatalytic degradation of methylene blue over Co₃O₄/Bi₂WO₆ composite under visible light irradiation", *Catalysis Communications*, 9, 6, pp. 1247-1253, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2007.11.011>
- [18] C. Han, L. Ge, C. Chen, Y. Li, X. Xiao, Y. Zhang, L. Guo, "Novel visible light induced Co₃O₄-g-C₃N₄ hetero-junction photocatalysts for efficient degradation of methyl orange", *Applied Catalysis B: Environmental*, 147, pp. 546-553, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.09.038>

Reconversión agroecológica de páramos en Colombia: propuesta de herramienta para clasificar fincas

Agroecological reconversion of moorlands in Colombia: proposal for a farm's classification tool

Diego Alejandro Rojas-Ramírez¹, Ingrid Varela-Benavides², Tomas Guzmán-Hernández³, Fabian Enrique Martinez-Camelo⁴

Fecha de recepción: 3 de enero, 2023
Fecha de aprobación: 11 de abril, 2023

Rojas-Ramírez, D.A; Varela-Benavides, I; Guzmán-Hernández, T; Martinez-Camelo, F.E. Reconversión agroecológica de páramos en Colombia: propuesta de herramienta para clasificar fincas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 27-39.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6510>

- 1 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Colombia. Correo electrónico: darojas@agrosavia.co
<https://orcid.org/0000-0002-6092-7428>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: invarela@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-1210-2664>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tjuzman@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-2719-8550>
- 4 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Colombia. Correo electrónico: fmartinez@agrosavia.co
<http://orcid.org/0000-0002-0671-6443>

Palabras clave

Agricultura sostenible; agroecosistemas; campesinos; reconversión de la producción; desarrollo rural.

Resumen

Para el año 2018 entra en vigor la ley 1930 que plantea la reconversión productiva agroecológica de las actividades agrícolas en los páramos de Colombia. Esta ley exige la inclusión de las personas que viven y mantienen actividades agropecuarias en el páramo en los procesos de reconversión, pero no plantea mecanismos para reconocer las diferentes formas de agricultura que existen en este ecosistema. Por ende, se diseñó una herramienta con el objetivo de clasificar fincas a partir de 9 criterios y 16 indicadores, como parte de su validación, la herramienta fue comparada con un método de clasificación estadístico empleado comúnmente. Con el método propuesto se obtuvieron cuatro tipologías de finca donde el 6% de la muestra fue clasificada como agroecológico próximo, el 35% como campesino tradicional, el 10% como agroindustrial incipiente y el 48% como productor transicional. Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas entre el campesino tradicional y el agroindustrial incipiente porque emplean un manejo agronómico similar. La herramienta propuesta prioriza la cosmovisión y el arraigo tanto como la productividad, a diferencia del método estadístico que redujo los criterios para la clasificación priorizando indicadores productivos. La herramienta propuesta permite definir rutas particularizadas a escala finca y planificar procesos de transición cumpliendo la ley, pero incorporando capacidades locales reales, el conocimiento disponible y la cosmovisión de la familia en torno al futuro de la finca.

Keywords

Sustainable agriculture; agroecosystems; small farmers; production reconversion; rural development.

Abstract

For the year 2018, law 1930 comes into force, which proposes the agroecological productive reconversion of agricultural activities in the moorlands of Colombia. This law requires the inclusion of people living and maintaining agricultural activities in the moorland in the reconversion processes but does not propose mechanisms to recognize the different forms of agriculture that exist in this ecosystem. Therefore, a tool was designed with the objective of classifying farms based on 9 criteria and 16 indicators. As part of its validation, the tool was compared with a commonly used statistical classification method. With the proposed method, four farm typologies were obtained where 6% of the sample was classified as near agroecological, 35% as traditional farmer, 10% as incipient agro-industrial and 48% as transitional producer. Statistically, no significant differences were found between the traditional farmer and the incipient agro-industrial farmer because they use similar agronomic management. The proposed tool prioritizes worldview and rootedness as much as productivity, unlike the statistical method that reduced the criteria for classification by prioritizing productive indicators. The proposed tool makes it possible to define particularized routes at the farm scale and to plan transition processes in compliance with the law, but incorporating real local capacities, available knowledge, and the family's cosmovision of the farm's future.

Introducción

En Colombia han sido amplios los marcos legislativos y normativos bajo los cuales se ha reglamentado el uso y conservación de los recursos naturales de los que se disponen en diferentes ecosistemas del país [1]. El ecosistema de páramos no es ajeno a esta realidad, ya que desde el año 1995 con la ley 40 se crea el marco normativo para la adecuación de tierras y se crean las figuras de distrito de riegos y de drenajes como estrategia para el desarrollo y la organización de la actividad agropecuaria en estos lugares [2].

Posteriormente durante el año 2018 entra en funcionamiento la ley 1930, “*Por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia*” con una visión holística que incluye tanto el uso y aprovechamiento de los recursos naturales como la participación incluyente de las comunidades [3]. Esta ley plantea que las actividades agropecuarias deben realizar una transición productiva hacia formas de producción de base agroecológica, no obstante, implica un reto técnico y económico ya que en los páramos se encuentra el 50 % de la producción de papa (*Solanum tuberosum*), el 90 % de la producción de cebolla de rama (*Allium fistulosum*) y el 40 % de la producción de leche de ganado vacuno (*Bos taurus*) cuyos criterios técnicos incluyen prácticas provenientes de la revolución verde [4], adicionalmente, el páramo abastece el 80 % del recurso hídrico consumido por la población urbana y periurbana [5], y abastecen las centrales hidroeléctricas que generan el 70 % de la energía eléctrica del país lo cual plantea una serie de posibles conflictos socioecológicos alrededor de este ecosistema.

Aunque la ley es clara respecto al proceso de transición y enfatiza en el enfoque participativo territorial, no plantea mecanismos para reconocer las diferentes formas de agricultura que coexisten con la agricultura de revolución verde en los ecosistemas de páramo [6]. En algunas aproximaciones se ha considerado la tipificación estadística, que si bien brinda un integro soporte para clasificar fincas a partir de aspectos como los rendimientos por unidad de área y los costos de producción por unidad de producto [7], [8], aún genera dudas respecto a su alcance en la aproximación de base agroecológica ya que deja exentos aspectos que el campesino integra en su rutina como parte integral para la gestión de su finca y consecuentemente del territorio.

Bajo este escenario el objetivo de este trabajo es proponer una herramienta metodológica para clasificar fincas a partir de las capacidades y expectativas de la población, pero también reconocer los conocimientos y las capacidades locales como alternativas que pueden ser útiles tanto para la reconversión productiva como para un aprovechamiento sostenible de los recursos del páramo.

Materiales y métodos

El trabajo fue desarrollado en Colombia con información de 31 productores ubicados en tres páramos entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca (figura 1): Chingaza, Tota-Bijagual-Mamapacha y Guerrero. El complejo Chingaza está ubicado entre los departamentos de Cundinamarca y Meta, con una extensión mayor a 64 500 hectáreas, tiene influencia directa sobre 20 municipios, incluyendo Bogotá, la capital de Colombia, a la que abastece con un 90 % del agua que consume. En términos agropecuarios resalta principalmente la producción de papa y la ganadería bovina para leche, aunque también existe un segmento de ganadería porcina importante [9].

Por su lado, el complejo Tota-Bijagual-Mamapacha se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá, con una extensión de 127 310 hectáreas, contiene el Lago de Tota, segundo más grande del mundo por encima de los 3 000 msnm y concentra hasta el 80 % de la producción de cebolla de rama consumida en el país. Por último, el complejo de Guerrero está ubicado

en el norte de Cundinamarca, con una extensión de 39 240 hectáreas, es también uno de los páramos con mayor intervención antrópica evidenciada por la baja cobertura vegetal nativa, aun así, Guerrero abastece de agua a 14 municipios [9]. En este complejo predomina la producción de papa y la ganadería bovina para leche, aunque se han identificado algunas organizaciones que emplean prácticas de base agroecológica [10].

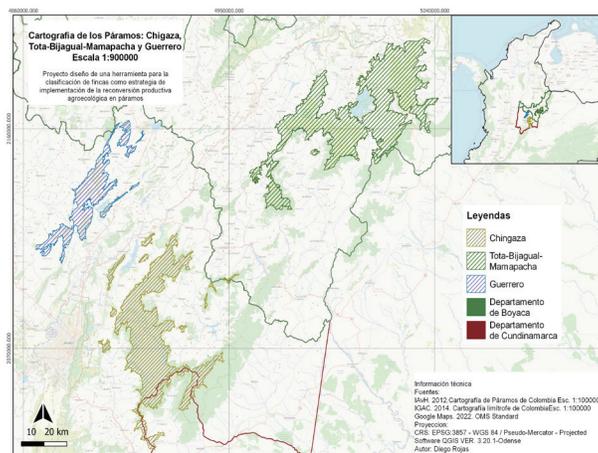


Figura 1. Ubicación de los tres complejos de páramos en donde se llevó a cabo el estudio. Fuente. Propia a partir de bases de datos geográficas.

Estas particularidades ambientales y productivas conforman un sistema socioecológico y su entendimiento implica un marco de aproximación holístico[11]. Para este caso se tomó como referente el marco propuesto por Toledo et al. [12] quienes plantean la utilización de nueve criterios diferenciadores como estrategia de entendimiento de la diversidad de agriculturas que hacen parte de ese sistema socioecológico:

1. Energía: Tipo de energía utilizada durante el proceso de producción, en algunos casos predomina la energía solar y convertidores biológicos (plantas, animales y microorganismos). En otros casos tiende a maximizar el uso de energía fósil.
2. Escala: Es la disponibilidad de tierra para la producción, es común la pequeña escala como el acceso a grandes áreas para producción.
3. Autosuficiencia: Es el autoconsumo de lo producido. En algunos casos se consume una parte sustancial de la producción. Por otra parte, está el enfoque donde todo lo producido se convierte en un producto/servicio y es comercializado.
4. Fuerza de trabajo: Son las estrategias para realizar labores agrícolas necesarias en la unidad productiva. Es común el trabajo familiar, el uso de tracción animal hasta la mecanización.
5. Reciclaje: Es la decisión de reaprovechar o reutilizar aquellos desechos inherentes a la producción.
6. Diversidad: Es el aprovechamiento de la biodiversidad disponible. La agricultura por sí misma puede ser una actividad central o complementaria en la economía de la finca. También es común la especialización agrícola del monocultivo.
7. Productividad: Es la eficiencia energética. En algunos casos la fotosíntesis conjunta de diferentes especies vegetales permite obtener suficiente biomasa aprovechable, en otros casos, se emplea energía adicional en forma de paquetes estandarizados (maquinarias, fertilizantes químicos, semillas mejoradas, plaguicidas químicos) para una obtención de volúmenes importantes de biomasa.

8. Conocimiento: Es el tipo de saberes que se emplea durante el proceso productivo. En algunos casos deriva de la práctica cotidiana y tiene un carácter holístico, en otros casos, es predominantemente técnico y especializado en el uso de paquetes estandarizados.
9. Cosmovisión: Es la visión que se tiene del territorio y de los mecanismos para el aprovechamiento de sus recursos. En algunos es ecocéntrica y heredada, en otros casos es productivista, donde la naturaleza se concibe como entidad sujeta de ser manipulada.

Luego de definir los criterios, se le asignó un porcentaje de 11.11 % a cada uno, lo cual en sumatoria de los nueve da 100 %. Consecuentemente se utilizó información de algunos tratados sobre agroecología [13] y las estructuras para verificación de la norma Global GAP [14] en el diseño de los indicadores y las escalas de valoración para cada criterio como se observa en el cuadro 1. Las escalas diseñadas por indicador están compuestas por una valoración cualitativa que permite la recolección de información en fincas y su equivalente en escala cuantitativa calculada a partir de los cocientes obtenidos de los indicadores para cada criterio y la generación de agregados de los desempeños.

Cuadro 1. Indicadores y escalas de valoración.

Criterio	Nombre indicador	Escala de valoración		
		Cualitativa	Cuantitativa	
Energía	1. Energía actividades agropecuarias agropecuaria	1. Uso exclusivo de fuentes de energía renovables	1.23 %	
		2. Uso mixto energías renovables y no renovables	2.47 %	
		3. Uso exclusivo de energías no renovables	3.70 %	
	2. Insumos para el control de poblaciones	1. Orgánico y/o biológico	0.74 %	
		2. Orgánico y/o biológico+ Inorgánico	1.48 %	
		3. Orgánico y/o biológico+ síntesis química	2.22 %	
		4. Síntesis química + inorgánico	2.96 %	
		5. Sólo síntesis química	3.70 %	
	3. Fertilizantes	1. Orgánico y/o biológico	0.74 %	
		2. Orgánico y/o biológico+ Inorgánico	1.48 %	
		3. Orgánico y/o biológico+ síntesis química	2.22 %	
		4. Síntesis química + inorgánico	2.96 %	
		5. Sólo síntesis química	3.70 %	
	Escala	4. Área en policultivo	1. > 50 %	1.12 %
			2. Entre 30 y 50 %	2.24 %
3. Entre 10 y 30 %			3.36 %	
4. Entre 1 y 10%			4.48 %	
5. <1 %			5.56 %	
5. Área en actividades para conservación		1. > 50% del área	1.12 %	
		2. Entre el 49 -30 %	2.24 %	
		3. Entre el 29-10 %	3.36 %	
		4. Entre el 9-1 %	4.48 %	
		5. No tiene zona de conservación	5.56 %	
Autosuficiencia	6. Destino final producto/servicio	1. Solo autoconsumo	2.78 %	
		2. Autoconsumo (alto)+ Venta (bajo)	5.56 %	
		3. Autoconsumo (bajo)+ Venta (Alto)	8.30 %	
		4. Solo venta	11.11 %	

Criterio	Nombre indicador	Escala de valoración	
		Cualitativa	Cuantitativa
Fuerza de trabajo	7. Tipo de arado	1. Labranza mínima	1.40 %
		2. Arado manual	2.80 %
		3. Tracción animal	4.20 %
		4. Mecanizado	5.56 %
	8. Relación con trabajadores	1. Familiar	1.40 %
		2. Vecinal	2.80 %
		3. Mixta	4.20 %
		4. Asalariado	5.56 %
Reciclaje	9. Manejo de Residuos	1. Se reutilizan todos los residuos	3.70 %
		2. Se utilizan parcialmente, una parte se desecha	7.40 %
		3. No se reutilizan en ningún proceso	11.11 %
Diversidad	10. Agrobiodiversidad	1. Alta diversidad productiva	1.23 %
		2. Diversidad productiva intermedia	2.47 %
		3. Especificidad productiva	3.70 %
	11. Especies forestales y flora nativa	1. Reconoce >71 %	0.74 %
		2. Reconoce entre el 51-70 %	1.48 %
		3. Reconoce entre el 31-50 %	2.22 %
		4. Reconoce entre el 11- 30 %	2.96 %
		5. Reconoce <10 %	3.70 %
	12. Plantas medicinales	1.Reconoce > 91 %	0.74 %
		2. Reconoce entre el 71-90%	1.48 %
		3. Reconoce entre el 51-70%	2.22 %
		4. Reconoce entre el 31 - 50%	2.96 %
5. Reconoce menos del 30%		3.70 %	
Productividad	13. Uso de Agrobiodiversidad	1. >2 cultivos principales con 2 - 3 variedades	1.40 %
		2. >2 cultivos principales con 1 variedad	2.80 %
		3. 1 cultivo principal con 2 - 3 variedades	4.20 %
		4. 1 cultivo principal con 1 variedad	5.56 %
	14. Especies animales	1. >11 especies animales	1.40 %
		2. 5 y 10 especies animales	2.80 %
		3. 2 y 4 especies animales	4.20 %
		4. Una especie animal	5.56 %
Conocimiento	15. Base del conocimiento en el manejo de la finca	1. Prácticas basadas solo en conocimiento tradicional	2.78 %
		2. Prácticas basadas en conocimiento técnico especializado (-) y en conocimiento tradicional (+)	5.56 %
		3. Prácticas basadas en conocimiento técnico especializado (+) y en conocimiento tradicional (-)	8.30 %
		4. Prácticas basadas solo en conocimiento técnico especializado	11.11 %
Cosmovisión	16. Arraigo con el territorio	1. Local	2.78 %
		2. Municipio aledaño	5.56 %
		3. Ciudades próximas	8.30 %
		4. Origen foráneo	11.11 %

Con la información del cuadro 1 se diseñó el instrumento de captura y los mecanismos de verificación que permitieron recopilar información sobre inventario de insumos agropecuarios, registros de aplicaciones de insumos, origen del material de siembra empleado, volúmenes de cosechas, distribución y magnitud de áreas en las fincas mediante la observación directa, mediciones con GPS, registros fotográficos y registros de trazabilidad cuando estuvieran disponibles. Teniendo en cuenta la escala de valoración cuantitativa del cuadro 1, se diseñaron las tipologías de productor que se observan en el cuadro 2. Para las tipologías se utilizó una escala de valoración acumulativa de porcentajes donde se calcularon las sumatorias entre los valores más altos y bajos de cada indicador y la conformación de rangos equidistantes entre valores para cada criterio.

Cuadro 2. Tipologías de productor.

Tipología	Rango porcentual (%)
Agroecológico	25-40
Agroecológico próximo	41-55
Productor transicional	56-70
Campesino tradicional	71-80
Agroindustrial incipiente	81-100

La información obtenida se ingresó en la plataforma estadística Jamovi versión 2.3.18 donde se consolidó una base de datos y se realizaron dos tipos de análisis: el primero correspondió a estadística descriptiva donde se tuvo mayor énfasis en las medidas de tendencia central y la clasificación de las fincas entrevistadas en las categorías correspondientes. El segundo fue dirigido a comparar las categorías diseñadas frente a una tipificación estadística, en este caso se realizaron análisis de correlaciones múltiples, componentes principales y análisis de conglomerados [8].

Resultados

Empleando los porcentajes distribuidos para cada indicador que se presentó en el cuadro 1 y el desempeño obtenido para cada finca, se realizó la sumatoria de los porcentajes totales acumulados como se observa en la figura 2. Estos acumulados permitieron clasificar las fincas de acuerdo con las tipologías propuestas del cuadro 2.

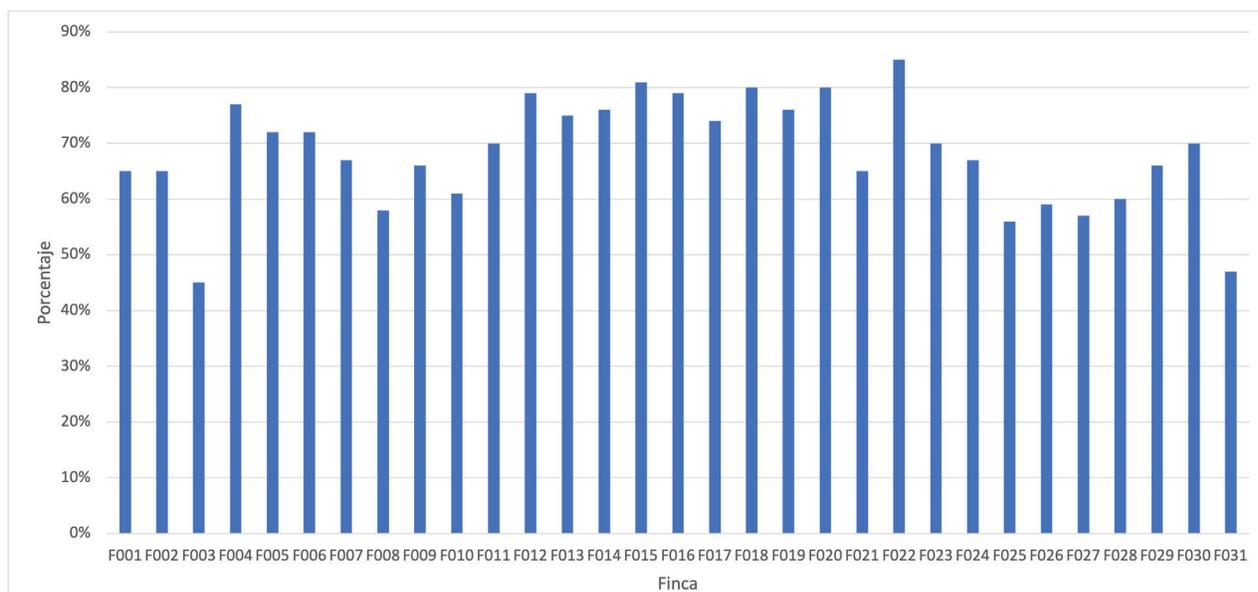


Figura 2. Valores porcentuales obtenidos mediante la sumatoria de los indicadores para cada finca.

De acuerdo con las tipologías, el grupo más grande de la muestra entrevistada quedó clasificada como productor transicional, luego sigue el grupo del campesino tradicional, posteriormente el agroindustrial incipiente y finalmente el grupo más pequeño correspondiente al agroecológico próximo como se observa en la figura 3.

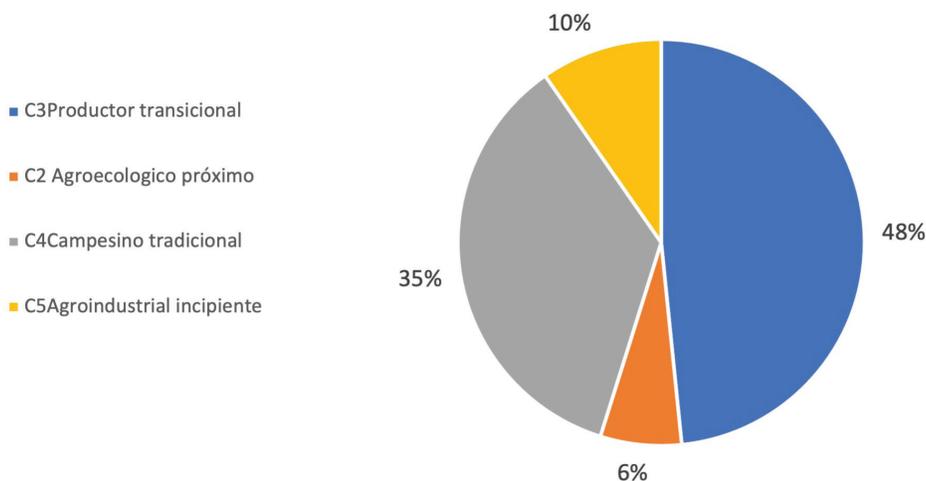


Figura 3. Distribución de la muestra entre las tipologías diseñadas.

El conjunto de datos disponible presentó normalidad (p-valor: 0.420) y varianza heterogénea (p-valor: 0.071). Consecuentemente la información de los indicadores diseñados fue analizada como variables independientes, por lo cual, se sometieron a una prueba de correlaciones de Spearman (figura 4). Fueron empleadas 16 variables de análisis en donde los valores superiores a 0.30 indican una correlación significativa, cabe resaltar que los valores observados de 1 no se tienen en cuenta puesto que toda variable tendrá fuerte correlación consigo misma y los valores negativos indican correlaciones inversas que no son restrictivas para el modelo. En el caso de este estudio, algunas variables tienen altas correlaciones lo cual se vuelve un criterio para disminuir la dimensionalidad del modelo.

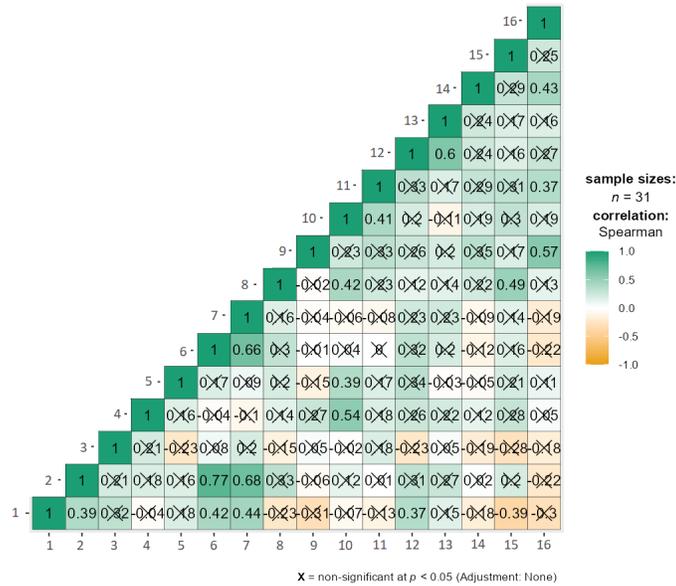


Figura 4. Matriz de correlaciones de Spearman entre las variables empleadas como indicadores de la herramienta.

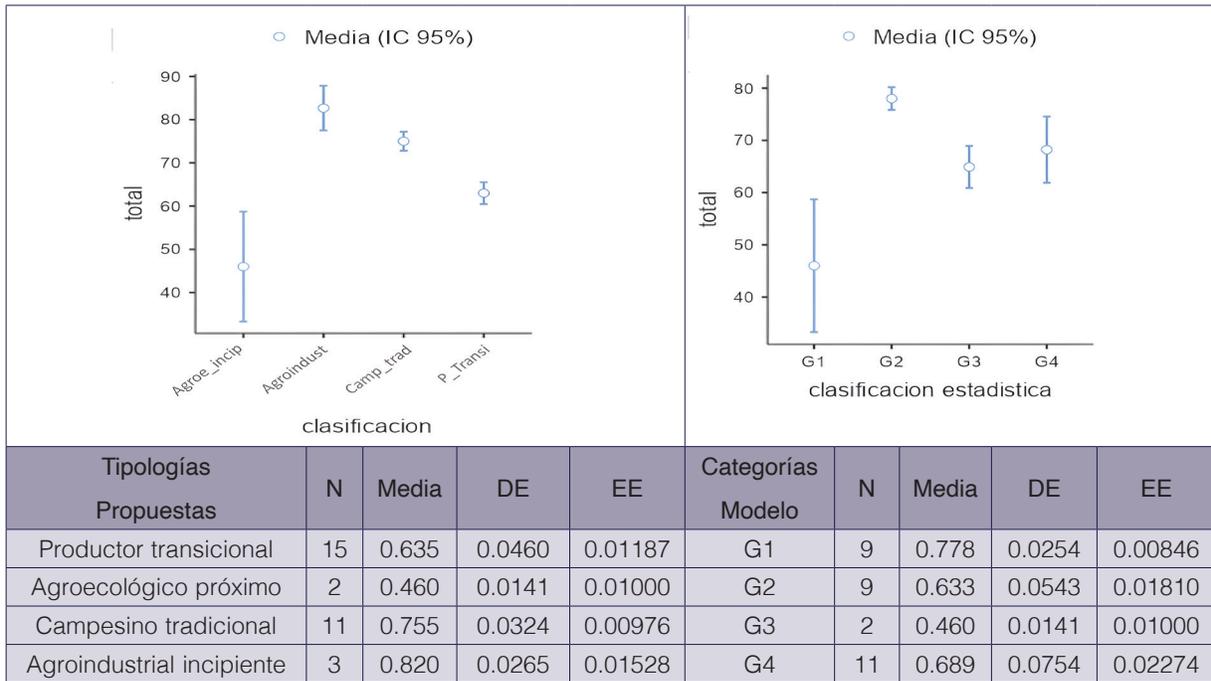
Posteriormente se realizó un análisis por componentes principales que tiene en cuenta la elección de factores con valor propio >1 . En este caso hasta el factor 5 se obtuvo valores propios >1 y una varianza acumulada del 75.5% del modelo que para efectos del tamaño de la muestra es aceptable ya que en estudios similares se acepta hasta un 70 % de la varianza acumulada hasta el cuarto o quinto factor[7].

Cuadro 3. Valores Propios obtenidos para los componentes.

Componente	Valor Propio	% de la Varianza	% Acumulado
1	2.8976	24.147	24.1
2	1.9869	16.557	40.7
3	1.6295	13.579	54.3
4	1.4628	12.190	66.5
5	1.0775	8.979	75.5
6	0.8096	6.747	82.2
7	0.6447	5.372	87.6
8	0.6282	5.235	92.8
9	0.3497	2.914	95.7
10	0.2752	2.293	98.0
11	0.1566	1.305	99.3
12	0.0818	0.682	100.0

Otro aspecto importante para tener en cuenta es la correlación de las variables respecto a los factores. En el cuadro 4 se observa que el primer componente tiene una fuerte correlación con los indicadores inventario de agrobiodiversidad y plantas medicinales que están asociados al criterio de Diversidad y el indicador de área en policultivo del criterio Escala, para el segundo factor es importante un indicador del criterio Diversidad y un indicador del criterio Productividad. Para el tercer factor es importante dos indicadores del criterio Energía, el cuarto factor presenta correlación alta con un indicador de Escala y en el último factor un indicador del criterio Fuerza de trabajo.

Cuadro 5. Análisis de varianza para cada modelo de clasificación de fincas.



Discusión

La clasificación de fincas mediante métodos estadísticos ha sido una herramienta ampliamente utilizada para procesos de intervención y transferencia tecnológica [7], [15], más recientemente se han considerado otros métodos para la clasificación de fincas dirigidos a evaluar la sostenibilidad de la actividad agropecuaria y en este trabajo se proyecta como base para la estrategia de reconversión productiva. Consecuentemente, una clasificación de fincas debe estar encaminada a servir de soporte para aproximaciones al territorio más asertivas. En algunos casos se ha documentado la incorporación de elementos de planificación rural preferiblemente participativa (PRP) [16] que se realizan a escala paisaje, no obstante, elementos de los criterios de Diversidad, Productividad y Cosmovisión incluidos en la herramienta consideran aspectos relacionados a la proyección de la finca en el mediano plazo como en la PRP, adicionalmente incluyen una aproximación escala finca lo cual permitiría que la ruta de transición sea particularizada a esta escala y posteriormente si llegar a la escala paisaje.

Así mismo, los mecanismos de verificación empleados dependen del criterio del evaluador aunque el uso de registros de trazabilidad como un medio de verificación [14] principalmente para las dimensiones de Energía y Productividad, no fue eficiente porque solo una finca de toda la muestra cuenta con registros, esto concuerda con lo descrito por González y Rodríguez [17] quienes indican que el uso de registros de trazabilidad no implica necesariamente que exista un manejo racional de materiales e insumos lo cual constituye un elemento a fortalecer en esta herramienta.

Respecto a las tipologías, el productor agroecológico próximo tiene fortalezas en aspectos como la cosmovisión donde se evidencia una conceptualización robusta sobre agroinsumos, las semillas transgénicas, revolución verde y demás temas tratados en la agroecología política [18]–[20], también se evidenció fortalezas en el criterio de Biodiversidad porque sus sistemas productivos tienen alta agrobiodiversidad que fue importante para la seguridad alimentaria durante la pandemia por covid-19 porque los excedentes fueron comercializados y otra parte

fue distribuida localmente como parte de intercambios por fuerza de trabajo. Se deben tener en cuenta que, en algunas especies como papa, los rendimientos del agroecológico próximo son más bajos (12 toneladas/ha) frente al campesino tradicional (33 toneladas/ha) si se comparase como un monocultivo.

El campesino tradicional se suele relacionar con una producción poco tecnificada y de tipo familiar y comunitaria [10], [21], [22], pero en este trabajo se identifica al productor campesino más cerca del agroindustrial incipiente porque busca ser más eficiente en un monocultivo, demanda un mayor uso de insumos de síntesis química, emplea mecanización agrícola y utiliza frecuentemente operarios asalariados, paralelamente, al tener fincas con mayor área (9.18 ha), se permite destinar áreas para conservación en donde se da prioridad a especies de flora y fauna local por su fácil adaptación y rusticidad.

El productor transicional es un perfil que explora opciones y alternativas, es un grupo diverso que integra productores campesinos informados sobre el impacto ambiental de la agricultura de revolución verde, y población externa asentada en el páramo, estos perfiles integran elementos del arquetipo agroecológico como el aumento de la biodiversidad en todas sus formas cuando es posible, el manejo de suelos con prácticas como la labranza mínima, la fertilización orgánica y manejo de plagas basado en insumos orgánicos, biológicos e inorgánicos, entre otras [13], [23], [24], en algunos casos incorporan conceptos como la permacultura, en donde no se hace uso de ningún tipo de insumos [25], también buscan desarrollar modelos de autoconsumo e incluir alternativas económicas como el ecoturismo, la producción de forestales, viveros, fabricación de productos procesados a partir de la biodiversidad entre otras alternativas.

Conclusiones y recomendaciones

La herramienta de clasificación permite identificar perfiles de productores, capacidades y falencias técnicas, la conceptualización de los términos empleados para cada categoría no es necesariamente fiel a los conceptos empleados en la literatura, no obstante, la herramienta aproxima a una comprensión integral de la realidad de la población rural del páramo por parte de tomadores de decisiones y plantea reflexiones en torno a cómo abordar la transición productiva en estos ecosistemas. Por otro lado, se sugiere fortalecer capacidades técnicas en productores agroecológicos próximos e identificar a los productores transicionales que tengan emprendimientos que puedan convertirse en alternativas de transición viables para la conservación de los medios de vida en los páramos.

Agradecimientos

Se agradece a las asociaciones y familias campesinas que facilitaron la información para llevar a cabo este estudio, así mismo a los profesionales Irina Narváez y José Hernández quienes aportaron metodológicamente a este trabajo.

Referencias

- [1] M. Santamaría, A. Areiza, C. Matallana, C. Solano, and S. Galán, *Estrategias complementarias de conservación en Colombia*. 2018.
- [2] S. Rubiano Galvis, "Protección de páramos y derechos campesinos. Aportes jurídicos y de política.," *reponame: Repositorio Institucional de Documentación Científica Humboldt Digital*, 2015.
- [3] *Ley 1939 de 2018 por medio de la cual se dictan disposiciones para la gestión integral de los páramos en Colombia.*, no. 1930. Colombia, 2018, p. 14. [Online]. Available: http://www.andi.com.co/Uploads/Ley-2018-N0001930_20180727.pdf

- [4] DANE, "Evaluaciones Agrícolas y Anuario Estadístico del Sector Agropecuario," Bogotá, Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/paginas/home.aspx?cod=59>
- [5] C. Sarmiento, A. Osejo, P. Ungar, and J. Zapata, "Páramos habitados: desafíos para la gobernanza ambiental de la alta montaña en Colombia. Biodiversidad en la práctica.," *Documentos de trabajo del Instituto Humboldt. Volumen 2 - Número 1 - 2017 - pp. 122-145.*, vol. 2 N° 1, pp. 122–145, 2017.
- [6] M. Mejía, *Agriculturas para la vida: Un enfoque desde sistemas populares colombianos*, 1er ed. Cali, Colombia, 1995.
- [7] R. H. de León-García, G. Thomas, and O. Castillo, "Caracterización y tipificación de pequeñas fincas doble propósito de la provincia de Bocas del Toro- Panamá," *Ciencia Agropecuaria*, no. 29, pp. 13–40, 2018, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-79202017000200003
- [8] G. Escobar and J. Berdegué, *Tipificación De Sistemas De Producción Agrícola*, 1er ed. Santiago de Chile: Red Internacional de Metodología de Investigación de Sistemas de Producción, 1990.
- [9] M. Morales *et al.*, *Atlas de páramos de Colombia*, 1er ed. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2007.
- [10] Renaf, "Mercados Agroecológicos en Bogotá-Cundinamarca," Bogotá, Colombia, 2021. [Online]. Available: <http://agriculturafamiliar.co/con-la-agricultura-familiar-y-sus-mercados-llevo-el-campo-colombiano/mercados-locales-agroecologicos/mercados-en-bogota-cundinamarca/>
- [11] L. R. Norton, "Is it time for a socio-ecological revolution in agriculture?" *Agric Ecosyst Environ*, vol. 235, pp. 13–16, 2016, doi: 10.1016/j.agee.2016.10.007.
- [12] V. Toledo, P. Alarcón-Cháires, and L. Barón, *La Modernización rural de México: Un análisis socioecológico*, Primera ed., no. 1. Ciudad de Mexico, 2002. [Online]. Available: <https://biblioteca.ecosur.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=000039609>
- [13] S. Sarandón and C. C. Flores, *Libros de Cátedra Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables* Santiago Javier Sarandón, no. June. Buenos Aires, 2014.
- [14] Fao, *A scheme and trainig manual on good agricultural practices (GAP) for fruits and vegetables: Volume 1 the scheme - standard and implementation infrastructure*. Bangkok, 2016. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/i6677e/i6677e.pdf>
- [15] S. Alvarez, W. Paas, K. Descheemaeker, P. Tittonell, and J. Groot, *Construcción de tipologías, una forma de manejar la diversidad de las fincas*, 1st ed., vol. 1. Wageningen, Países Bajos, 2014. Accessed: Jul. 07, 2022. [Online]. Available: <https://edepot.wur.nl/375028>
- [16] C. Sandoval, A. Sanhueza, and A. Williner, "Manual para la planificación participativa para lograr un cambio estructural con igualdad," *Manuales de la CEPAL*, no. 2, p. 74, 2015.
- [17] J. González and E. M. Rodríguez, "Factores que condicionan la aplicación de buenas prácticas agrícolas: un enfoque cualitativo," *Nexos*, vol. 17, no. 27, pp. 19–26, 2010, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/277737113_Factores_que_condicionan_la_aplicacion_de_buenas_practicas_agricolas_un_enfoque_cualitativo
- [18] P. Rosset and M. A. Altieri, *AGROECOLOGÍA CIENCIA Y POLÍTICA*, 3rd ed., vol. 1. La Paz, Bolivia: Fundación TIERRA, 2018.
- [19] J. Gastó *et al.*, *Vertientes del pensamiento agroecológico: Fundamentos y Aplicaciones*, 1st ed., vol. 1. Medellín, Colombia: Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología, 2009.
- [20] C. Nicholls, L. Ríos, and M. Altieri, *Agroecología y resiliencia socioecológica: adaptándose al cambio climático*. 2013.
- [21] J. D. van der Ploeg, *Peasants and the Art of Farming*. 2013. doi: 10.3362/9781780448763.
- [22] J. D. Van Der Ploeg, "Diez cualidades de la agricultura familiar," *LEISA Revista de Agroecología*, 2013.
- [23] S. Gliessman, *Agroecología Procesos Ecológicos en Agricultura Sostenible*. San José, Costa Rica: CATIE, 2002. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books/about/Agroecología_procesos_ecológicos_en_ag.html?id=rnqan8BOVNAC&redir_esc=y
- [24] M. A. Altieri, P. Koohafkan, E. H. Gimenez, and W. Division, "Agricultura verde: Fundamentos agroecológicos para diseñar sistemas agrícolas biodiversos, resilientes y productivos," *Agroecología*, vol. 7, no. 1, pp. 7–18, 2012, [Online]. Available: <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/170961>
- [25] B. Mollison, *Permaculture - A Designers' Manual*. 1988.

Relaciones entre variables en berenjena (*Solanum melongena*)

Relations among variables in eggplant (*Solanum melongena*)

José Eladio Monge-Pérez¹, Cristina Arguedas-García², Michelle Loría-Coto³

Fecha de recepción: 25 de enero, 2023

Fecha de aprobación: 3 de mayo, 2023

Monge-Pérez, J.E; Arguedas-García, C; Loría-Coto, M. Relaciones entre variables en berenjena (*Solanum melongena*). *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 40-50.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6508>

- 1 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 Colegio Técnico Profesional Ambientalista Isaías Retana Arias, Ministerio de Educación Pública, Pedregoso, Pérez Zeledón, Costa Rica. Correo electrónico: cris31oct@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9358-1454>
- 3 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

Correlación de Pearson; correlación de Spearman; regresión lineal; espinas; fitomejoramiento.

Resumen

Se calcularon las correlaciones entre diez variables, para dos híbridos de berenjena cultivados bajo invernadero. Las variables evaluadas fueron: ancho de hoja (AH, en cm), número de espinas por hoja (NEH), altura de planta (AP, en cm), longitud de fruto (LF, en cm), diámetro de fruto (DF, en cm), número de espinas en el cáliz (NEC), número de semillas por fruto (NSF), peso del fruto (PF, en g), número de frutos por planta (NFP), y rendimiento (R, en kg/planta). Los datos de las variables AP, NEC y NSF no mostraron una distribución normal; y lo contrario sucedió con las demás variables. Se encontró una correlación de Spearman significativa entre NEC y NEH ($r = 0,96^*$). Se hallaron siete correlaciones de Pearson que fueron significativas, entre las siguientes variables: LF y PF ($r = 0,98^{**}$), LF y DF ($r = 0,95^{**}$), PF y R ($r = 0,94^{**}$), NEH y DF ($r = -0,93^{**}$), LF y R ($r = 0,93^{**}$), DF y PF ($r = 0,92^{**}$), y DF y R ($r = 0,85^*$); en estos casos se obtuvo la ecuación de regresión lineal y su coeficiente de determinación (R^2). Dado que PF, LF y DF fueron las únicas variables que mostraron una correlación significativa con R, por lo que se consideran características muy importantes para el proceso de fitomejoramiento en berenjena.

Keywords

Pearson correlation; Spearman correlation; linear regression; spines; plant breeding.

Abstract

For two eggplant hybrids grown under greenhouse conditions the researchers calculated the correlations among ten variables: leaf width (LW, in cm), number of spines per leaf (NSL), plant height (PH, in cm), fruit length (FL, in cm), fruit diameter (FD, in cm), number of spines per calyx (NSC), number of seeds per fruit (NSF), fruit weight (FW, in g), number of fruits per plant (NFP), and yield (Y, in kg/plant). Data for variables PH, NSC and NSF did not show a normal distribution; the opposite was the case for all other variables. A significant Spearman correlation was found between NSC and NSL ($r = 0.96^*$). Seven significant Pearson correlations were found between the following variables: FL and FW ($r = 0.98^{**}$), FL and FD ($r = 0.95^{**}$), FW and Y ($r = 0.94^{**}$), NSL and FD ($r = -0.93^{**}$), FL and Y ($r = 0.93^{**}$), FD and FW ($r = 0.92^{**}$), and FD and Y ($r = 0.85^*$); in these cases, linear regression equations and determination coefficients (R^2) were obtained. FW, FL and FD were the only variables that showed a significant correlation with Y, and so they should be considered key traits for breeding processes in eggplant.

Introducción

La berenjena (*Solanum melongena* L.) es una especie de la familia Solanaceae, originaria de las zonas tropicales y subtropicales de África y Asia, que fue domesticada en India y China; presenta una planta cuya altura varía entre 0,4 y 1,5 m cuando está completamente desarrollada [1] [2] [3] [4]. Existen tres variedades botánicas principales en esta especie; var. *esculentum*, de frutos redondos u ovalados; var. *serpentinum*, con frutos alargados; y var. *depressum*, cuyos frutos son enanos [5]. Existe una amplia variedad de colores, formas y tamaños de sus frutos [6], los cuales se consumen hervidos, al vapor, deshidratados, o cocidos con diferentes tipos de carne, entre otros [7] [4].

La berenjena posee propiedades beneficiosas para la salud, con efectos contra la diabetes, gonorrea, inflamaciones, cólera, gastritis, estomatitis, artritis, bronquitis, problemas hepáticos y hemorroides; además, ayuda a reducir el índice de colesterol en la sangre, y tiene efecto laxante [8] [9] [10] [4]. Por otra parte, los frutos son ricos en fósforo, hierro, potasio, magnesio, calcio, zinc, cobre, manganeso, vitamina B, proteínas, fibra, carbohidratos, fenoles, ácido ascórbico y ácidos grasos [5] [11] [12] [4].

Muchos genotipos presentan plantas con espinas, pero también existen otros materiales genéticos que no las poseen, los cuales son preferidos por los consumidores y agricultores, pues se evitan los daños en las labores de cultivo, cosecha, y durante la compra y preparación [13]. Se ha informado que los genotipos que presentan espinas en el tallo son también más resistentes al ataque de insectos; sin embargo, dicho ataque es menor en los genotipos que presentan espinas en el cáliz, seguido de los que las tienen en las hojas, y finalmente por los que las tienen en el tallo [4]. La presencia de espinas en la planta puede ser un factor clave para la defensa contra insectos herbívoros, al limitar su capacidad de movimiento y extender el tiempo requerido para que encuentren sitios de alimentación [4].

El rendimiento es un carácter cuantitativo de naturaleza compleja, controlado por muchos genes, y que depende de las interacciones de muchos factores con el ambiente [14] [9] [1]. El éxito de cualquier programa de fitomejoramiento depende de la existencia de variabilidad genética en la población base, y de la eficiencia de la selección; para una selección eficaz es necesario estudiar la naturaleza de la asociación del carácter de interés con otros caracteres relevantes, y también la variabilidad genética disponible [6] [15] [9].

La herramienta estadística del coeficiente de correlación indica el grado y dirección de la asociación entre variables dependientes e independientes [16] [17] [11] [18] [1]. La correlación entre caracteres es importante cuando se quiere realizar selección simultánea de caracteres, o cuando un carácter de interés presenta baja heredabilidad, problemas de medición o identificación; en este caso, al seleccionar otro carácter de alta heredabilidad, de fácil medición o identificación y que registre alta correlación con el carácter deseado, el fitomejorador podrá obtener progresos más rápidos con respecto a la selección directa [18] [1]. El estudio de la asociación entre el rendimiento y sus componentes, a través de la estimación de las correlaciones, favorece una selección más eficiente y operativa para los fitomejoradores [6] [5]; los caracteres que están positivamente correlacionados con el rendimiento son de considerable importancia para los propósitos de selección en fitomejoramiento [19].

Diversos estudios en berenjena han demostrado que existe correlación positiva entre el rendimiento y el número de frutos por planta, mientras que la correlación entre rendimiento y peso del fruto varía en función del tamaño; las variedades de frutos pequeños pueden producir una mayor cantidad de estos por racimo floral, lo que favorece el rendimiento, mientras que en las de frutos grandes se presenta con frecuencia aborto natural de algunas flores lo cual favorece el rendimiento [1].

Existen varias investigaciones sobre correlaciones entre características en berenjena que se han desarrollado en diversos países [1] [9] [18] [11] [5] [14] [17] [20] [21] [16] [8] [15] [22] [6] [23] [24] [7] [25] [26] [27] [19] [28] [29] [30]; sin embargo, no se ha realizado anteriormente un estudio de este tipo en Costa Rica.

El objetivo del trabajo fue estudiar las relaciones entre diez variables en el cultivo de berenjena producida bajo ambiente protegido.

Materiales y métodos

El ensayo se desarrolló en un invernadero marca Richel tipo multicapilla, en la Estación Experimental Agrícola “Fabio Baudrit Moreno”, de la Universidad de Costa Rica, la que se ubica en Barrio San José de Alajuela, Costa Rica, y cuya altitud es de 883 msnm. El cultivo se estableció del 14 de agosto de 2013 al 20 de enero de 2014. Los materiales genéticos de berenjena (*Solanum melongena* L.) utilizados fueron los híbridos F-1 denominados JMX-292 (frutos de color blanco) y JMX-1099 (frutos de color púrpura-negro), provenientes de Estados Unidos; su caracterización fue informada en un trabajo anterior [31].

Las plántulas fueron trasplantadas en bolsas plásticas de 1 m de largo, 20 cm de ancho y 18 cm de alto, rellenos con fibra de coco. La distancia entre plantas fue de 0,5 m, y entre hileras de 1,54 m, por lo que la densidad de siembra fue de 1,30 plantas/m².

Para el abastecimiento de nutrientes y agua a las plantas se usó un sistema de fertirriego. Las plantas se podaron a dos ejes, a partir de la bifurcación del tallo principal.

Las variables evaluadas fueron:

1. Ancho de hoja (AH, en cm): se midió en 10 hojas por parcela.
2. Número de espinas por hoja (NEH): se evaluó en 10 hojas por parcela.
3. Altura de planta (AP, en cm): se midió esta característica al final del ensayo, a partir de la base de la planta y hasta el extremo distal, para todas las plantas de cada parcela.
4. Longitud de fruto (LF, en cm): se midió en el total de frutos cosechados para cada parcela, y se obtuvo el promedio.
5. Diámetro de fruto (DF, en cm): se midió en el total de frutos cosechados para cada parcela, y se obtuvo el promedio.
6. Número de espinas en el cáliz (NEC): se evaluó en el total de frutos cosechados.
7. Número de semillas por fruto (NSF): se evaluó en 10 frutos por parcela.
8. Peso del fruto (PF, en g): se obtuvo para cada fruto cosechado, y se obtuvo el promedio, para cada parcela.
9. Número de frutos por planta (NFP): se obtuvo al contabilizar el número total de frutos cosechados en cada parcela, y se dividió entre la cantidad de plantas de la parcela
10. Rendimiento (R, en kg/planta): se obtuvo al dividir el peso de los frutos obtenidos en cada parcela, entre la cantidad de plantas por parcela.

Para medir el ancho de hoja, longitud y diámetro de fruto, y altura de planta, se empleó una cinta métrica de la marca Assist, modelo 32G-8025, con $800,0 \pm 0,1$ cm de capacidad. Para evaluar el peso de cada fruto se usó una balanza electrónica de la marca Ocony, modelo TH-I-EK, con una capacidad de $5000,0 \pm 0,1$ g.

Se usó un diseño de bloques completos aleatorios, con dos tratamientos (híbridos) y tres repeticiones, y cada parcela tuvo ocho plantas, pero solamente se evaluaron las seis que se ubicaron en la posición central de la misma, que se consideraron la parcela útil.

A los datos de todas las variables se les aplicó la prueba de Shapiro-Wilks modificado, la cual confirmó que ellos se ajustaron a una distribución normal, con excepción de AP, NEC, y NSF, que presentaron una distribución no normal. En consecuencia, para las tres variables que no mostraron una distribución normal se calculó el coeficiente de correlación de Spearman; mientras que para las otras siete variables se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre ellas, y para las combinaciones en que se halló significancia estadística ($p \leq 0,05$), se calculó la ecuación de regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2).

Resultados y discusión

Para las variables evaluadas, en el cuadro 1 se presentan los estimadores estadísticos. Se presentó un alto coeficiente de variación en las variables NEH y NEC. La otra variable que también mostró una variabilidad amplia de los datos fue NSF.

Cuadro 1. Estimadores estadísticos de variables evaluadas en berenjena.

Variable	Promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Mediana	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
AH	22,53	20,98	24,40	22,43	1,16	5,17
NEH	0,81	0	2,25	0,46	0,98	121,38
AP	183,46	173,67	213,33	178,54	15,08	8,22
LF	14,61	13,13	17,37	14,40	1,55	10,61
DF	7,68	7,15	8,33	7,70	0,46	5,95
NEC	1,64	0,14	3,94	0,92	1,81	110,63
NSF	409,77	162	642,60	427,68	231,96	56,61
PF	275,01	241,94	333,88	274,90	32,88	11,95
NFP	17,92	15,67	19,17	18,17	1,23	6,88
R	4,94	3,79	6,23	4,90	0,78	15,85

Nota: AH: ancho de hoja (cm); NEH: número de espinas por hoja; AP: altura de planta (cm); LF: longitud de fruto (cm); DF: diámetro de fruto (cm); NEC: número de espinas en el cáliz; NSF: número de semillas por fruto; PF: peso del fruto (g); NFP: número de frutos por planta; R: rendimiento (kg/planta).

Para las variables que no presentaron una distribución normal de los datos (NEC, NEH y AP), la única correlación de Spearman que fue significativa correspondió a la obtenida entre NEC y NEH ($r = 0,96^*$). En el cultivo de berenjena, las espinas están presentes en la hoja, el tallo, el cáliz y el pedúnculo; la presencia de espinas es una característica dominante, y controlada por un solo gen [13]. Por lo tanto, era lógico esperar una alta correlación positiva (directamente proporcional) entre NEH y NEC, tal y como se obtuvo en el presente ensayo, al ser una característica que depende de un único gen en esta hortaliza.

Los coeficientes de correlación de Pearson (r) que se calcularon entre las siete variables que sí mostraron una distribución normal de los datos, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre variables evaluadas en berenjena.

	AH	NEH	LF	DF	PF	NFP	R
AH	1	-0,51ns	0,22ns	0,34ns	0,37ns	-0,11ns	0,23ns
NEH		1	-0,78ns	-0,93**	-0,75ns	-0,17ns	-0,65ns
LF			1	0,95**	0,98**	0,43ns	0,93**
DF				1	0,92**	0,34ns	0,85*
PF					1	0,41ns	0,94**
NFP						1	0,70ns
R							1

Nota: AH: ancho de hoja (cm); NEH: número de espinas por hoja; LF: longitud de fruto (cm); DF: diámetro de fruto (cm); PF: peso del fruto (g); NFP: número de frutos por planta; R: rendimiento (kg/planta). ns: no significativa; *: significativa ($p \leq 0,05$); **: altamente significativa ($p \leq 0,01$).

Del total de correlaciones de Pearson calculadas, 14 de ellas no fueron significativas, una resultó significativa ($p \leq 0,05$), y seis tuvieron una alta significación ($p \leq 0,01$).

La correlación hallada entre NEH y DF fue altamente significativa y negativa ($r = -0,93^{**}$). La regresión lineal calculada entre ambas variables ($R^2 = 0,86$) se presenta en la figura 1; a menor número de espinas en la hoja, el diámetro del fruto fue mayor. No se hallaron informes en la literatura sobre otras investigaciones que hayan estudiado la correlación entre estas variables.

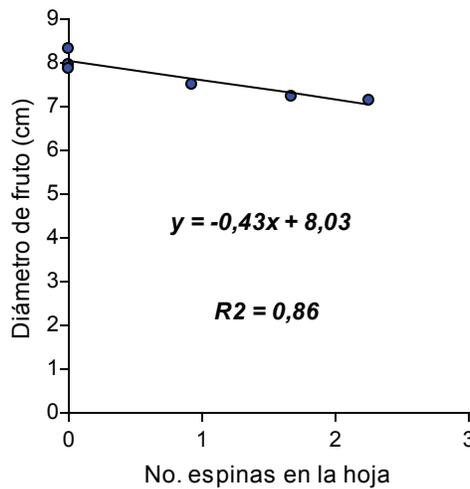


Figura 1. Regresión lineal del diámetro del fruto (DF) versus el número de espinas por hoja (NEH) en berenjena.

La correlación que se encontró entre PF y DF fue altamente significativa y positiva ($r = 0,92^{**}$). La regresión lineal entre estas variables ($R^2 = 0,85$) se presenta en la figura 2; al aumentar el diámetro del fruto, se incrementa su peso. De igual manera, otros autores también han informado sobre una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre dichas variables en el cultivo de berenjena [9] [11] [14] [17] [21] [16] [8] [15] [22] [6] [7] [25] [19] [28] [29]. Sin embargo, otros investigadores encontraron que esta correlación no fue significativa [5] [24] [26] [27].

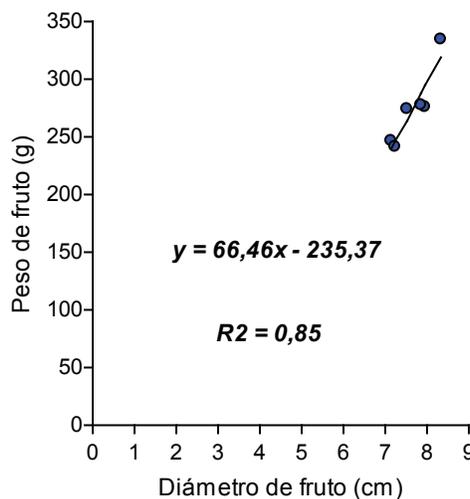


Figura 2. Regresión lineal del peso del fruto (PF) versus el diámetro del fruto (DF) en berenjena.

La correlación calculada entre LF y DF fue altamente significativa y positiva ($r = 0,95^{**}$). La regresión lineal entre estas variables ($R^2 = 0,91$) se muestra en la figura 3; conforme aumenta la longitud del fruto, se incrementa también su diámetro. Igualmente, en otros estudios en berenjena se ha encontrado también una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas variables [16] [22] [26]. Sin embargo, en otras ocasiones se ha hallado una correlación negativa, y significativa o altamente significativa, entre ellas [9] [18] [5] [15] [6] [7] [25] [28] [29]; e inclusive otros autores han informado que esta correlación no fue significativa [11] [14] [17] [20] [21] [8] [24] [27] [19].

La correlación encontrada entre LF y PF fue altamente significativa y positiva ($r = 0,98^{**}$). La regresión lineal entre dichas variables ($R^2 = 0,96$) se presenta en la figura 4; por lo que, al aumentar la longitud del fruto, se incrementa también su peso. De la misma forma, otros investigadores también han informado sobre una correlación positiva y altamente significativa, entre dichas variables en berenjena [17] [16] [22] [24]. Sin embargo, otros autores han hallado una correlación negativa y altamente significativa entre ellas [28]; mientras que otros han informado que esta correlación no fue significativa [1] [9] [11] [5] [14] [21] [8] [15] [6] [7] [25] [26] [27] [19] [29].

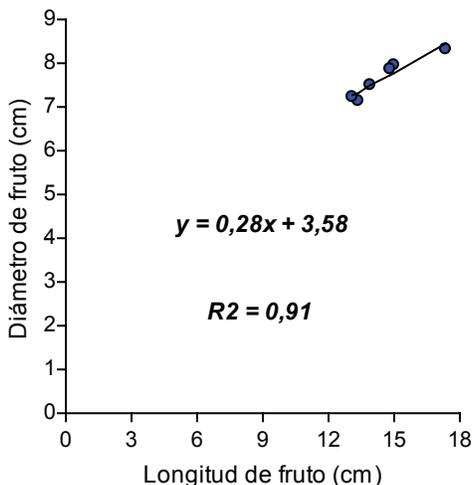


Figura 3. Regresión lineal del diámetro del fruto (DF) versus la longitud del fruto (LF) en berenjena.

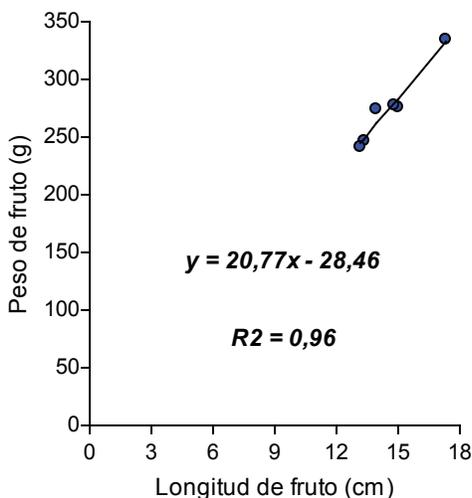


Figura 4. Regresión lineal del peso del fruto (PF) versus la longitud del fruto (LF) en berenjena.

La correlación que se obtuvo entre R y DF fue positiva y significativa ($r = 0,85^*$). La regresión lineal estimada entre estas variables ($R^2 = 0,72$) se muestra en la figura 5; el rendimiento aumenta conforme se incrementa el diámetro del fruto. Igualmente, otros investigadores también han hallado en berenjena una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas variables [14] [20] [21] [16] [22] [6] [7] [25] [29]. Sin embargo, otros investigadores informaron que esta correlación no fue significativa [9] [18] [11] [5] [17] [8] [15] [24] [26] [27] [19] [28].

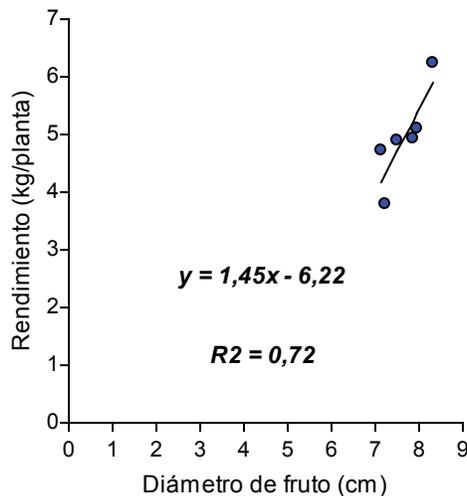


Figura 5. Regresión lineal del rendimiento (R) versus el diámetro del fruto (DF) en berenjena.

La correlación hallada entre R y LF fue positiva y altamente significativa ($r = 0,93^{**}$). En la figura 6 se presenta la regresión lineal entre dichas variables ($R^2 = 0,86$); al aumentar la longitud del fruto se incrementa el rendimiento. De la misma forma, en otras ocasiones se ha hallado en berenjena una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas variables [9] [18] [11] [5] [17] [20] [16] [6] [25]. Sin embargo, en otras ocasiones esta correlación no fue significativa [1] [14] [21] [8] [15] [22] [24] [7] [26] [27] [19] [28] [29].

La correlación que se encontró entre R y PF fue altamente significativa y positiva ($r = 0,94^{**}$). La regresión lineal calculada entre estas variables ($R^2 = 0,88$) se presenta en la figura 7; conforme se aumenta el peso del fruto, se incrementa el rendimiento. Igualmente, en otros estudios en berenjena, también se ha encontrado una correlación positiva, y significativa o altamente significativa, entre estas variables [11] [14] [21] [16] [6] [7] [25] [19] [29] [30]. Sin embargo, otros investigadores han informado que esta correlación no fue significativa [1] [9] [5] [17] [8] [15] [22] [23] [24] [26] [27] [28].

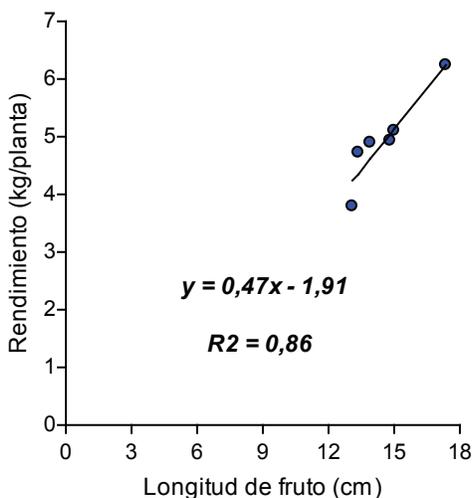


Figura 6. Regresión lineal del rendimiento (R) versus la longitud del fruto (LF) en berenjena.

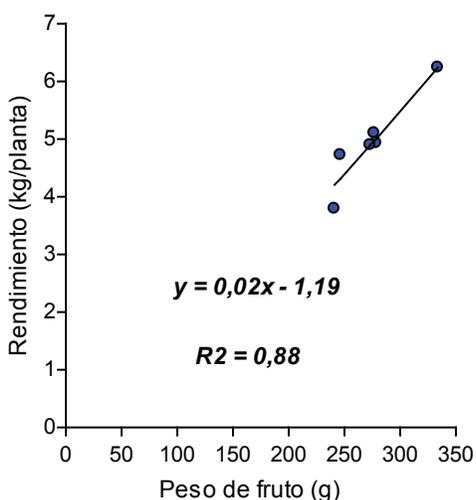


Figura 7. Regresión lineal del rendimiento (R) versus el peso del fruto (PF) en berenjena.

Las diferencias encontradas entre los datos informados en la literatura y los obtenidos en el presente ensayo, para todas las variables, se pueden explicar por las diferencias en los materiales genéticos que fueron utilizados en cada trabajo, así como en las diferentes condiciones ambientales que prevalecieron en cada uno de los sitios de experimentación, y en las distintas metodologías de manejo del cultivo (nutrición, densidad de siembra, tipo de sustrato, etc.) empleadas en cada investigación.

El presente trabajo corresponde al primer estudio publicado sobre correlaciones entre variables en el cultivo de la berenjena, desarrollado en Costa Rica.

Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que el peso, la longitud y el diámetro del fruto fueron las únicas variables que mostraron una correlación significativa con el rendimiento, por lo que se consideran muy importantes para el proceso de fitomejoramiento en berenjena.

La correlación obtenida entre el número de espinas en el cáliz y el número de espinas en la hoja fue muy alta y significativa.

Se recomienda ampliar la cantidad de materiales genéticos de berenjena incluidos en futuros ensayos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la labor de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés, y el apoyo financiero de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] H. Araméndiz, C. E. Cardona and M. M. Espitia, "Correlaciones fenotípicas, ambientales y genéticas en berenjena," *Acta Agronómica*, vol. 58, no. 4, pp. 285-291, 2009.
- [2] J. Prohens, J. E. Muñoz, A. Rodríguez-Burruezo and F. Nuez, "Últimos avances en la mejora genética de la berenjena," *Vida Rural*, no. 15 de octubre, pp. 52-56, 2005.
- [3] G. Kowalska, "Flowering biology of eggplant and procedures intensifying fruit set - review," *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, vol. 7, no. 4, pp. 63-76, 2008.
- [4] Z. Younas, S. Naseer, A. Kazmi, A. Ali, A. Wahab, T. Sultana, I. Shoukat, A. Hameed, M. Afzal, Z. Mashwani and M. Rahimi, "Assessment of diversity among important brinjal (*Solanum melongena*) cultivars using morphological markers," *Journal of Food Quality*, vol. 2022, no. 4255554, pp. 1-13, 2022.
- [5] S. Singh, H. D. Sharma, R. K. Dogra and A. U. V. Shilpa, "Correlation and path coefficient analysis for yield and yield contributing traits in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, no. Special Issue 11, pp. 1770-1777, 2020.
- [6] D. Arti, A. K. Sharma and S. Khar, "Studies on correlation and path analysis in brinjal (*Solanum melongena* L.) genotypes," *The Bioscan*, vol. 14, no. 1, pp. 31-34, 2019.
- [7] W. L. Konyak, S. P. Kanaujia, A. Jha, H. P. Chaturvedi and A. Ananda, "Genetic variability, correlation and path coefficient analysis of brinjal," *SAARC Journal of Agriculture*, vol. 18, no. 1, pp. 13-21, 2020.
- [8] J. Damnjanovic, Z. Girek, J. Milojevic, V. Zecevic, T. Zivanovic, M. Ugrinovic and S. Pavlovic, "Assessment of eggplant (*Solanum melongena* L.) genotypes and selection of parameters for better yield," *Chemistry Proceedings*, vol. 10, no. 31, pp. 1-5, 2022.
- [9] R. R. Lakshmi, S. S. V. Padma, L. N. Naidu and K. Umajyothi, "Correlation and path analysis studies of yield and yield components in brinjal," *Plant Archives*, vol. 14, no. 1, pp. 583-591, 2014.
- [10] A. C. C. Antonini, W. G. R. Robles, J. T. Neto and R. A. Kluge, "Capacidade produtiva de cultivares de berinjela," *Horticultura Brasileira*, vol. 20, no. 4, pp. 646-648, 2002.
- [11] M. I. Mahmoud and A. B. El-Mansy, "Assessment of eggplant (*Solanum melongena* L.) genotypes under north Sinai conditions," *Sinai Journal of Applied Sciences*, vol. 7, no. 3, pp. 207-220, 2018.
- [12] M. H. Aminifard, H. Aroiee, H. Fatemi, A. Ameri and S. Karimpour, "Responses of eggplant (*Solanum melongena* L.) to different rates of nitrogen under field conditions," *Journal of Central European Agriculture*, vol. 11, no. 4, pp. 453-458, 2010.
- [13] M. Pandiyan, B. K. Savitha, A. Veeramani, A. Gopikrishnan, C. Sivakumar, A. Krishnaveni and V. Radhakrishnan, "Studies on inheritance pattern of non spiny character in spiny brinjal," *Annals of Agricultural & Crop Sciences*, vol. 5, no. 2, pp. 1-4, 2020.
- [14] P. P. Singh, A. K. Verma and D. Singh, "Evaluation of brinjal genotype under hot arid agro-climate," *Indian Journal of Horticulture*, vol. 75, no. 3, pp. 451-456, 2018.
- [15] K. Patel, N. B. Patel, A. I. Patel, H. Rathod and D. Patel, "Study of variability, correlation and path analysis in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *The Bioscan*, vol. 10, no. 4, pp. 2037-2042, 2015.
- [16] K. Chithra, S. V. Devaraju, B. Varalakshmi, S. K. Shashikala and A. B. Asha, "Correlation and path analysis in segregating population of brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 9, no. 5, pp. 2457-2459, 2020.
- [17] S. G. Sakriya, M. A. Vaddoria, L. J. Raval and A. D. Balas, "Study on character association in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *International Journal of Chemical Studies*, Vols. SP-8, no. 2, pp. 37-39, 2020.

- [18] V. R. Gurve, D. P. Waskar, V. S. Khandare, S. P. Mehtre and D. G. More, "Studies on correlation and path analysis for yield and its contributing traits in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 9, no. 10, pp. 179-188, 2020.
- [19] R. A. Shende, S. S. Desai and V. V. Dalvi, "Character association and path analysis in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *International Journal of Agricultural Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 631-633, 2014.
- [20] G. Kustagi, H. B. Lingaiah, N. Jagadeesha, B. Ravikumar, N. Ashok and G. B. Srinivasulu, "Correlation and path analysis studies in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 8, no. 8, pp. 1100-1105, 2019.
- [21] G. S. Sujin, P. Karuppaiah and K. Saravanan, "Genetic variability and correlation studies in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Indian Journal of Agricultural Research*, vol. 51, no. 2, pp. 112-119, 2017.
- [22] V. Mangi, H. B. Patil, S. Mallesh, S. M. Karadi and D. Satish, "Character association and path analysis studies in brinjal (*Solanum melongena* L.) genotypes," *Journal of Applied and Natural Science*, vol. 9, no. 1, pp. 29-33, 2017.
- [23] M. M. Saleh, O. Muhra and Z. A. Suliman, "Selection criteria for yield in eggplant (*Solanum melongena* L.)," *Horticulture Biotechnology Research*, vol. 5, pp. 1-3, 2019.
- [24] C. Vidhya and N. Kumar, "Studies on correlation and path coefficient analysis in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Biochemical and Cellular Archives*, vol. 15, no. 1, pp. 181-184, 2015.
- [25] G. Nazir, K. Hussain, S. B. Zehra, U. H. Masoodi and S. Tabassum, "A study on correlation and path coefficient analysis of brinjal (*Solanum melongena* L.) for yield and yield contributing traits," *International Journal of Plant & Soil Science*, vol. 34, no. 21, pp. 763-768, 2022.
- [26] S. Saha, M. E. Haq, S. Parveen, F. Mahmud, S. R. Chowdhury and M. Harun-Ur-Rashid, "Variability, correlation and path coefficient analysis: principle tools to explore genotypes of brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Asian Journal of Biotechnology and Genetic Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 1-9, 2019.
- [27] D. Rameshkumar, R. S. Priya, B. K. Savitha, R. Ravikesavan and N. Muthukrishnan, "Correlation and path analysis studies on yield and yield components in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Electronic Journal of Plant Breeding*, vol. 12, no. 1, pp. 249-252, 2021.
- [28] M. Nikitha, B. N. Prabhakar, M. Padma, B. N. Bhat and N. Sivaraj, "Correlation and path coefficient analysis of yield and yield attributed characters in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, vol. 9, no. 5, pp. 1997-2002, 2020.
- [29] S. P. Dash, J. Singh, D. Sharma, P. Thakur and K. Nagraj, "Correlation and path coefficient analysis studies on yield and its attributing characters in brinjal (*Solanum melongena* L.)," *Journal of Entomology and Zoology Studies*, vol. 8, no. 3, pp. 1106-1109, 2020.
- [30] V. N. Onyia, U. P. Chukwudi, A. C. Ezea, A. I. Atugwu and C. O. Ene, "Correlation and path coefficient analyses of yield and yield components of eggplant (*Solanum melongena*) in a coarse-textured Ultisol," *Information Processing in Agriculture*, vol. 7, pp. 173-181, 2020.
- [31] C. Arguedas García and J. E. Monge Pérez, "Caracterización morfológica de dos genotipos de berenjena (*Solanum melongena*) cultivados en invernadero en Costa Rica," *Cuadernos de Investigación UNED*, vol. 9, no. 2, pp. 266-272, 2017.

Modelación computacional de la corrosión del refuerzo metálico de un concreto carbonatado

Computational modelling of steel rebars corrosion in carbonated concrete

Bruno Chinè-Polito¹, Ronald Jiménez-Salas², Rommel Cuevas-Kauffmann³

Fecha de recepción: 1 de febrero, 2023
Fecha de aprobación: 28 de mayo, 2023

Chinè-Polito, B; Jiménez-Salas, R; Cuevas-Kauffmann, R. Modelación computacional de la corrosión del refuerzo metálico de un concreto carbonatado. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 51-64.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6532>

- 1 Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: bchine@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-6966-5973>
- 2 Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rjimenez@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-2240-6840>
- 3 Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rcuevas@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-6727-1110>

Palabras claves

Concreto; carbonatación; corrosión del refuerzo metálico; ensayos de resistencia a polarización; modelación computacional.

Resumen

En el sector civil de la construcción, el concreto y el refuerzo metálico representan aun los materiales de mayor importancia, aunque sean muy vulnerables por los agentes atmosféricos, como en el caso de su degradación por corrosión. En este artículo se presenta un trabajo de modelación computacional de la corrosión del refuerzo metálico de un concreto carbonatado, basado en datos experimentales de un proceso de carbonatación acelerada y sucesiva corrosión de las varillas metálicas. El modelo ha sido completado incorporando los datos cinéticos experimentales de las reacciones electroquímicas de los electrodos que están en relación con el avance del frente de carbonatación. A partir de los valores experimentales del potencial de corrosión, densidad de corriente de corrosión, pendientes anódicas y catódicas de la curva de Tafel, se estiman las corrientes de intercambio anódicas y catódicas y finalmente se simula la corrosión de las varillas metálicas de muestras de concreto reforzado.

Keywords

Concrete; carbonation; metallic rebars corrosion; polarization resistance tests; computational modelling.

Abstract

In the construction sector, the concrete and the steel bars represent still the key components, although they are very vulnerable by the atmospheric agents, as in the case of their degradation caused by corrosion. In this work we present a computational modelling work of reinforced bars corrosion in a carbonated concrete, based on experimental data obtained from an accelerated carbonation process and successive corrosion of metallic bars. The model has been completed incorporating experimental kinetic data of the electrochemical electrode reactions linked to the carbonation front progress. Starting from the experimental values of corrosion potential, corrosion current density, and anodic and cathodic slopes of the Tafel curve, the values of anodic and cathodic exchange currents have been computed and then used to simulate the corrosion of the reinforcing bars in concrete samples.

Introducción

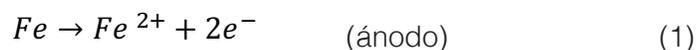
Aunque el concreto y el refuerzo metálico son muy vulnerables por los agentes atmosféricos, representan los materiales de mayor uso para la realización de obras civiles. Debido al aumento de CO_2 en la atmosfera por el cambio climático, se hace necesario evaluar el impacto de la corrosión sobre las estructuras civiles [1,2] por razones de seguridad y por los altos costos asociados a su reparación o sustitución. En Costa Rica el problema es relativamente importante por la insuficiencia de métodos de monitoreo de las estructuras existentes y la deficiente política preventiva en términos de mantenimiento. El concreto es fundamentalmente un material cerámico poroso [3], con una estructura expuesta a procesos de corrosión atmosférica originados por la carbonatación. Este mecanismo ataca el metal del concreto reforzado, el cual presenta una capa oxidada en su superficie, estable termodinámicamente y que lo protege de la corrosión (pasivación). Sin embargo, el dióxido de carbono CO_2 difundiendo en el concreto modifica las condiciones alcalinas de la solución dentro de los poros (reacciones de neutralización) y

la superficie metálica pierde la capa de protección (depasivación) [4]. Una serie de artículos fundamentales sobre el proceso de carbonatación se deben al autor Papadakis [5,6,7,8,9]. Los efectos de la carbonatación sobre propiedades mecánicas y durabilidad del concreto son estudiados mediante pruebas aceleradas [10], evaluando el rol de CO_2 y humedad relativa [11] y con un análisis estadístico para estimar la velocidad del fenómeno [12]. Se investigan las propiedades mecánicas de los refuerzos metálicos deteriorados por la corrosión [13] y se evalúan las velocidades de corrosión máxima y mínima de refuerzos metálicos [14]. Numerosos trabajos investigan el proceso de corrosión del refuerzo metálico, uno de los autores pioneros es Bazant [15]. Un estudio computacional de la corrosión por cloruros se desarrolla en [16], la dependencia del mecanismo de reacción catódica en función del grado de saturación de agua es objeto del trabajo de Huet *et al.* [17] y en [18] se analiza la cinética de la corrosión de varillas metálicas por carbonatación del concreto. También se desarrolla el acoplamiento del transporte de oxígeno con un modelo de corrosión micro-celda [19] y una evaluación de corrosión por cloruros en morteros de cemento [20]. Además, se simula la corrosión del refuerzo en un concreto carbonatado por CO_2 atmosférico [21] y más recientemente se investiga la corrosión del refuerzo en un proceso de carbonatación de un concreto binario alcalino-activado [22]. También han sido publicados numerosos trabajos computacionales, para estudiar la corrosión en muestras de aleaciones de aluminio usando Comsol Multiphysics [23] y para los casos de corrosión inducida por iones cloruros [24], entre otros. Se representa numéricamente el mecanismo electroquímico de re-alkalinización [25], el transporte de los agentes corrosivos y el sistema de reacciones electroquímicas [26]. Otros autores proponen una relación inversa entre densidad de corriente y potencial [27] o un algoritmo no-lineal para la modelación de la corrosión del acero [28]. Por otro lado, se usan reconstrucciones microestructurales del concreto con tomografía de rayos X computarizada [29] y se acoplan fenómenos de carbonatación y corrosión [30]. En [31] se estudia la corrosión bajo ataque salino y en [32] se implementa un modelo 3D para las fallas en refuerzos metálicos. También se brindan modelos para la propagación de la corrosión del acero [33], la carbonatación de materiales cementicios introduciendo una porosidad aleatoria [34] y el análisis de estructuras fisuradas por corrosión [35]. Se incorporan métodos computacionales de *phase field* para describir la superficie de un ánodo metálico [36] y se desarrollan estudios de las reacciones de corrosión [37]. Boukhlef *et al.* [38] sugieren un modelo computacional con soluciones analíticas y numéricas obtenidas por elementos finitos, otros analizan teóricamente la pendiente de la curva de Tafel anódica y el potencial eléctrico [39] o estudian el sistema de corrosión localizada [40]. Finalmente, varios trabajos recientes aplican métodos computacionales para la modelación de fenómenos de carbonatación y corrosivos, entre otros [41,42,43].

Modelación computacional del proceso de corrosión

Hipótesis del modelo

El proceso corrosivo puede romper la capa de pasivación que protege el acero, cuando la alcalinidad de la solución acuosa (electrolito) de los poros del concreto decrece por la carbonatación [15,4,44]. Consiste en la disolución de hierro en el agua de los poros, pues el hierro se oxida y los iones Fe^{2+} pasan en solución, según la reacción anódica:



siendo e^{-} es el electrón. Las regiones de la superficie del acero cercanas a las áreas anódicas se desempeñan como áreas catódicas y los e^{-} se mueven hacia allí, creando una corriente eléctrica desde regiones catódicas hacia anódicas. Simultáneamente, el oxígeno atmosférico

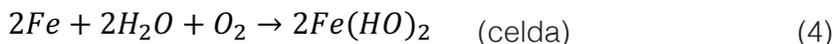
difunde en el concreto hacia la superficie metálica y, en los sitios catódicos a contacto con la solución acuosa, reacciona con los electrones de la reacción 1. Se origina la siguiente reacción de reducción con la formación de iones hidroxilo OH^- :



La corriente eléctrica pasa a través del electrolito, desde la superficie anódica hacia el área catódica y es originada por el transporte en sentido contrario de las cargas negativas OH^- . Por otro lado, los iones OH^- que llegan a la región anódica neutralizan eléctricamente los iones Fe^{2+} disueltos y forman una solución de hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$:



La reacción global de celda, sumando las reacciones 1, 2 y 3 es por lo tanto:



Las ecuaciones. 2,3,4 evidencian que el O_2 es fundamental para el fenómeno corrosivo del refuerzo metálico. Se asume que en los poros el agua es suficiente para el desarrollo de las reacciones anteriores, influenciando el proceso de corrosión mediante dos mecanismos [15]: a) el grado de saturación del agua afecta la resistividad eléctrica del concreto; b) del mismo grado de saturación depende el coeficiente de difusión de los gases O_2 y CO_2 .

Consecuentemente, se fijan las siguientes hipótesis para el modelo computacional:

- el concreto es un medio poroso no completamente saturado con agua, donde el fenómeno de carbonatación modifica el estado de pasivación del refuerzo metálico;
- el proceso de óxido-reducción se modela mediante oxidación de Fe y reducción del O_2 en la superficie total del refuerzo metálico (carbonatación tipo micro-celda);
- el O_2 atmosférico circunstante el concreto difunde en la fase gaseosa de los poros, hacia los refuerzos metálicos;
- las reacciones electroquímicas de corrosión son controladas por la concentración del O_2 en proximidad del refuerzo metálico, en presencia de suficiente agua;
- se desprecia el material oxidado del refuerzo y los cambios volumétricos de este;
- el fenómeno de corrosión se modela en condiciones estacionarias.

Para el modelo, se brindan en las secciones sucesivas la geometría y propiedades físicas de las muestras de concreto reforzado, los parámetros del proceso de carbonatación desarrollado experimentalmente en cámara acelerada y los valores de las mediciones electroquímicas [45].

Desarrollo del modelo con el software Comsol Multiphysics

La figura 1 esquematiza la geometría de una muestra de concreto reforzado [45], preparada con cemento hidráulico Holcim MP/A-28 y con los materiales y relativas cantidades del cuadro 1. La relación final agua/cemento en el concreto es de 0.57 con una tasa agregados/cemento de 4.17, aproximadamente. En la parte superior de figura 1 se muestra una vista vertical de la muestra y una sección metálica expuesta de 50 mm de largo para una barra de 130 mm de altura, indicando además los recubrimientos de silicona superior e inferior que aíslan estas regiones metálicas. La parte inferior de la figura brinda una sección horizontal con la posición, desde la superficie lateral, de las 5 varillas de acero de 10 mm de diámetro. En la misma figura se indica el sistema de coordenadas cartesianas rectangulares, x,y,z del modelo computacional

desarrollado en Comsol Multiphysics v5.4 [46] en condiciones estacionarias, isotérmicas a 25 °C y presión de 1 atm. Se estudia el caso de la corrosión de la muestra carbonatada por 33 días, excluyendo la varilla central en los cómputos, pues representa solo un electrodo de referencia. Para el O_2 gaseoso, se fija la concentración de 8.58 mol/m^3 en los bordes, que corresponde a un volumen parcial de oxígeno de 21% en la cámara de carbonatación. Con excepción de las superficies metálicas expuestas, donde se desarrollan las reacciones de reducción, todas las restantes paredes se consideran impermeables al O_2 . Usando una correlación de Papadakis *et al.* [7], al medio poroso se asigna una porosidad de 0.32 y una saturación de agua igual a 0.27, para una relación agua/cemento de 0.57 y humedad relativa de 65% en la cámara de carbonatación. Se asume que el O_2 se desplaza en la fase gaseosa de los poros, se estima su coeficiente de transporte efectivo en $2.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ en función de la porosidad y de la humedad relativa [7] y se fija también igual a 8.58 mol/m^3 la concentración inicial de O_2 en el dominio. Para la corrosión de las cuatro varillas de refuerzo, se modela el concreto como medio electrolítico con conductividad eléctrica efectiva de 0.005 S/m [31]. Con excepción de las regiones expuestas del metal, se impone que todas las restantes superficies son aisladas eléctricamente, en el electrolito y en el electrodo. Se desprecia el cálculo de la corriente eléctrica en el interior del metal, siendo la conductividad de este mucho mayor que la del electrolito. Finalmente, la malla computacional tridimensional desarrollada en Comsol Multiphysics para aplicar el método de elementos finitos numérico, se compone de 2.0×10^6 elementos tetraédricos y de 1.2×10^5 elementos triangulares, generando un modelo con alrededor de 8.55×10^5 grados de libertad.

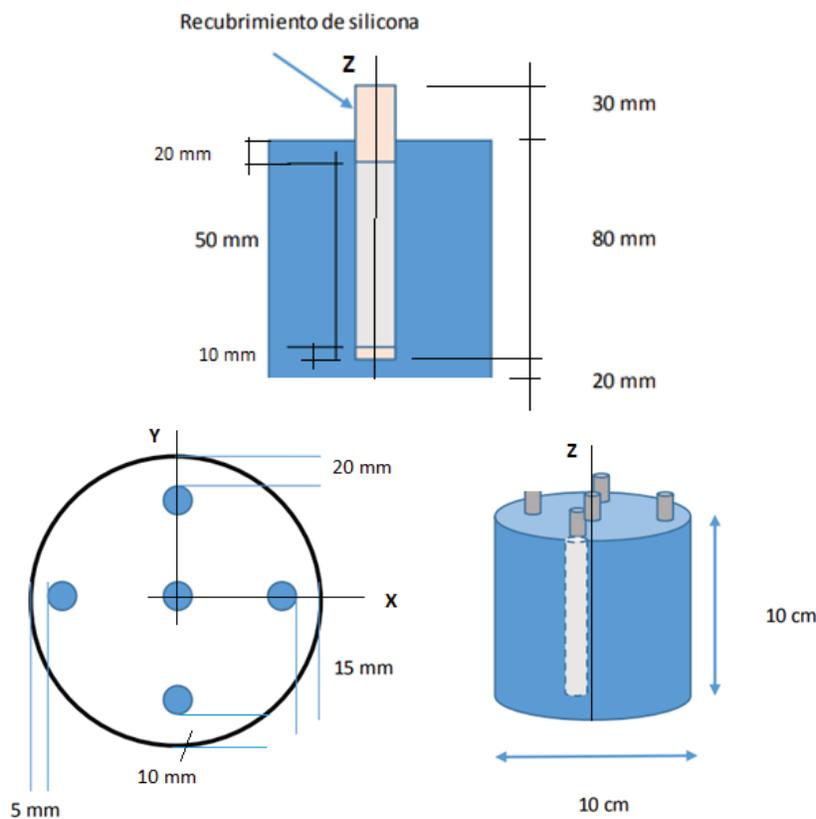


Figura 1. Esquema de la muestra de concreto reforzado con las barras de acero, dimensiones y orientación del sistema de coordenadas cartesianas rectangulares, x, y, z.

Cuadro 1. Dosificaciones de los materiales para la elaboración de la mezcla de concreto.

Material	Condición	Peso (kg)	Dosificación
Cemento Hidráulico (MP/A-28)	Seco	381.97	1
Arena	Húmeda	687.31	1.80
Piedra	Húmeda	907.12	2.37
Agua	Sin aditivo	197.45	0.52

Nota: la dosificación de agua/cemento es de 0.52; el valor final de la relación agua/cemento en el concreto es de 0.57, según los valores de humedad de la arena y piedra medidos en laboratorio.

Cinética de las reacciones electroquímicas

Parte fundamental del modelo computacional es la definición de la cinética de las reacciones electroquímicas en las superficies de los electrodos. Inicialmente, con el indicador fenolftaleína se estiman las profundidades carbonatada del concreto, que para la muestra carbonatada 33 días en la cámara acelerada, a una concentración de CO_2 del 25% y humedad relativa de 65%, es de es aproximadamente 18 ± 1 mm desde la superficie exterior. Para la misma muestra, el cuadro 2 reporta los valores experimentales del ensayo de polarización para las cuatro varillas colocadas a diferentes profundidades. A medida que la carbonatación es más intensa, cerca de las varillas que se encuentran a 5 mm y 10 mm desde la superficie externa, los potenciales de corrosión son más negativos y la intensidad de corriente es mayor. Para las varillas a 15 mm y 20 mm de profundidad los resultados son muy similares entre sí y evidencian que el metal mantiene aún un cierto grado de pasividad. Con los valores de potencial de corrosión E_{corr} , densidad de corriente de corrosión i_{corr} , pendientes anódicas ba y catódicas bc de la curva de Tafel, se pueden estimar las corrientes de intercambio anódicas y catódicas [44] de las varillas metálicas. La corriente de intercambio i_o para la oxidación del Fe se obtiene extrapolando la curva de Tafel anódica hacia el valor del potencial de equilibrio del Fe (- 0.631 V vs electrodo de $Ag/AgCl$ en solución 1M de KCl a 25 °C). Para la reducción del O_2 , la corriente de intercambio se determina extrapolando la curva de Tafel catódica hacia el valor del potencial de equilibrio del O_2 (1.007 V vs electrodo de $Ag/AgCl$ en solución 1M de KCl a 25 °C). En el cuadro se brindan los valores de i_o , de oxidación y reducción, para las cuatro barras de acero. Los valores de i_o , ba y bc se usan en el modelo para describir la cinética electroquímica de las interfaces metal/concreto.

Cuadro 2. Corrientes de intercambio de oxidación del hierro y de reducción del oxígeno, para las varillas de la muestra con 33 días de carbonatación, mediante ensayos de polarización (el potencial de corrosión E_{corr} se mide con respecto a un electrodo de $Ag/AgCl$ saturado, a 25°C).

Muestra	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	ba (V/dec)	bc (V/dec)	i_o de oxidación de Fe (A/cm ²)	i_o de reducción de O_2 (A/cm ²)
33-5 mm	-0,6507	9,1468E-06	0,92964	-0,91109	0.1017 E-04	0.1308 E-06
33-10mm	-0,6051	7,5005E-06	0,88559	-0,82915	0.0744 E-04	0.0800 E-06
33-15mm	-0,5685	4,0430E-06	0,64922	-0,60148	0.0351 E-04	0.0089 E-06
33-20mm	-0,5239	6,4684E-06	1,0871	-0,8971	0.0541 E-04	0.1199 E-06

Resultados y análisis

La figura 2 muestra el potencial eléctrico y las líneas de densidad de corriente del electrolito para la corrosión del refuerzo metálico. Cuando fluye corriente eléctrica, el concreto (electrolito) en las regiones donde las reacciones anódicas son más intensas, presenta un potencial eléctrico más positivo que el concreto de las regiones donde estas son menos intensas. Por lo tanto, cuando el Fe se oxida, los iones Fe^{++} se disuelven en el concreto cercano, mientras que los e^- de la reacción se desplazan en el metal y, en correspondencia de la región catódica, son disponibles para la reducción del O_2 . En figura 2 la densidad de corriente eléctrica en el electrolito es directamente proporcional a la diferencia de potencial eléctrico. Esta cantidad está dada por la diferencia entre el potencial del electrolito cercano a las regiones anódicas más intensas, menos el potencial del electrolito de aquella región donde el fenómeno corrosivo es menos intenso. La diferencia de potencial eléctrico permite el cálculo de la densidad de corriente, a través de la ley de Ohm. La figura 3 muestra la distribución de O_2 en un plano horizontal que secciona el cilindro en correspondencia de la mitad de su altura ($z = 50$ mm), intersecando las regiones metálicas de hierro. Se nota la disminución de O_2 en las áreas próxima a las varillas metálicas, en particular en las regiones que miran hacia el centro, debido al consumo de O_2 en las reacciones de reducción y que representa un sumidero modelado por la ley de Faraday.

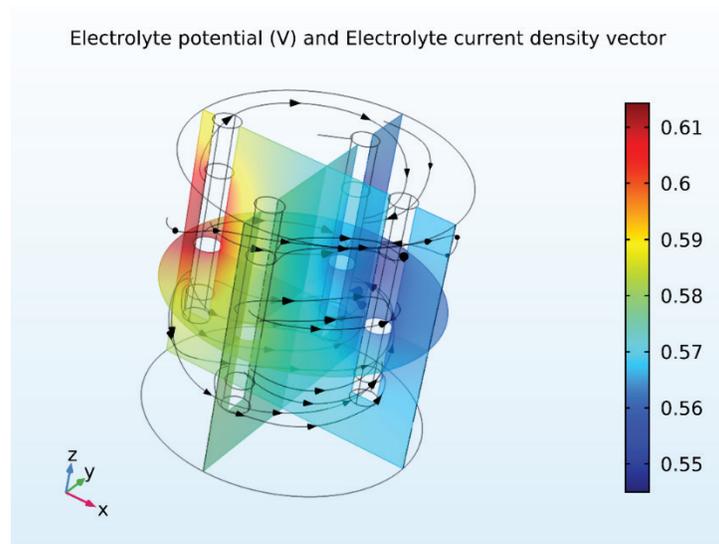


Figura 2. Valores de potencial eléctrico y líneas de densidad de corriente en el electrolito, para el proceso de corrosión del refuerzo metálico.

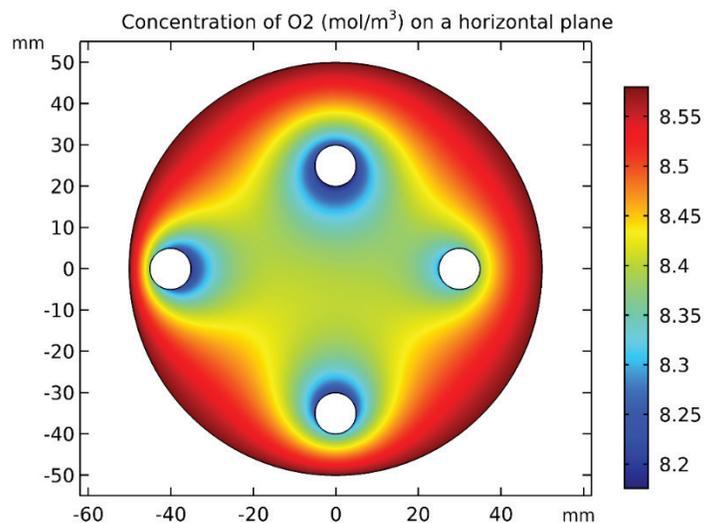


Figura 3. Concentración de oxígeno sobre un plano horizontal del concreto reforzado ($z = 50$ mm).

La figura 4 muestra las líneas de la densidad de corriente en el volumen del electrolito. Se nota que en proximidad de la barra posicionada a 5 mm de la superficie exterior en el lado negativo del eje x , la corriente eléctrica es más intensa y la concentración de O_2 es baja, por las reacciones de reducción que lo consumen. Para la barra ubicada a 20 mm de la superficie externa en lado positivo del eje y , la concentración de O_2 es aún más baja, pues este electrodo es más distante de la periferia, donde la concentración es alta. Para el modelo, que implementa la cinética electroquímica de las ecuaciones de Tafel y desprecia el cálculo de la corriente eléctrica en el interior del metal, se define nulo el potencial ϕ_s de la fase metálica y se calcula el sobrepotencial η con la expresión $\eta = \phi_s - \phi_l - E_{eq} = -\phi_l - E_{eq}$, donde E_{eq} es el potencial de equilibrio y ϕ_l el potencial del electrolito. Del cuadro 2 se obtienen las distintas corrientes de intercambio y pendientes de Tafel, para representar la reducción del O_2 y la oxidación del Fe para las cuatro varillas. La figura 5 muestra las líneas de densidad en el electrolito y el potencial eléctrico de los electrodos versus el de referencia. Las líneas de densidad de corriente del electrolito nacen en las regiones donde la oxidación del Fe es más intensa, es decir en las varillas más externas, en la zona carbonatada. El mecanismo se evidencia también en la figura 6 que traza el potencial del electrolito con la densidad de corriente en un plano horizontal a $z = 50$ mm. Se puede observar que las áreas con potencial mayor se ubican cerca de las varillas oxidadas más externas.

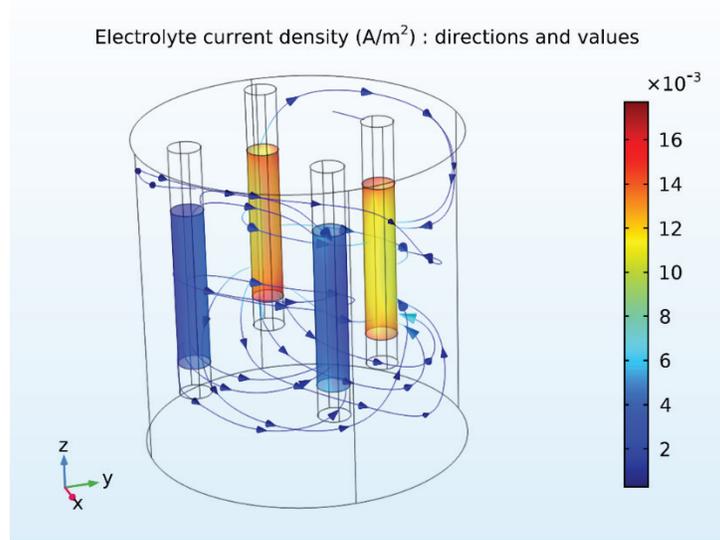


Figura 4. Líneas de densidad de corriente en el electrolito y valores en las fronteras de las varillas, para la corrosión metálica del refuerzo.

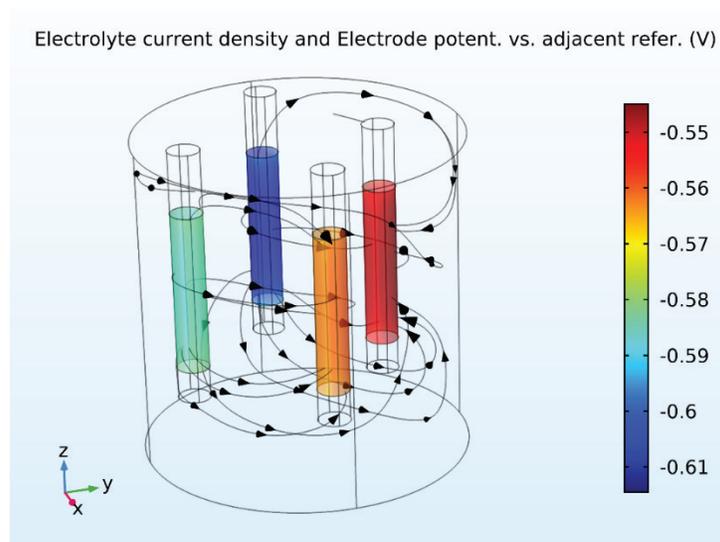


Figura 5. Líneas de densidad de corriente en el electrolito y potencial eléctrico de los electrodos vs referencia en el proceso de corrosión del refuerzo metálico.

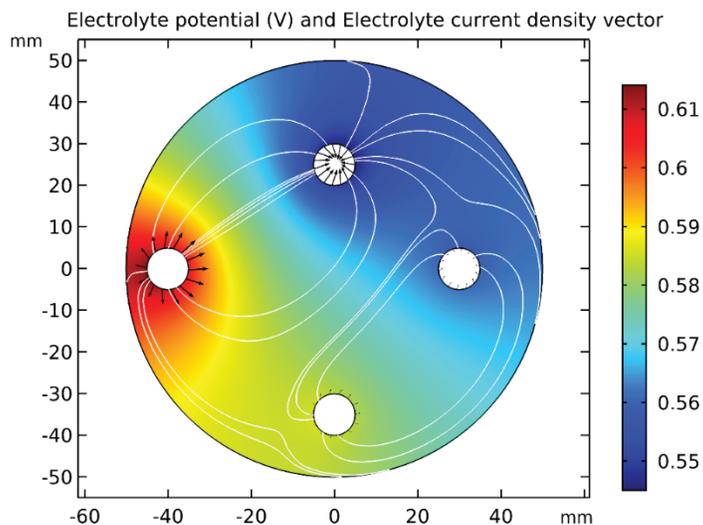


Figura 6. Valores de potencial eléctrico y líneas de densidad de corriente en el electrolito, sobre un plano horizontal del concreto reforzado ($z = 50$ mm).

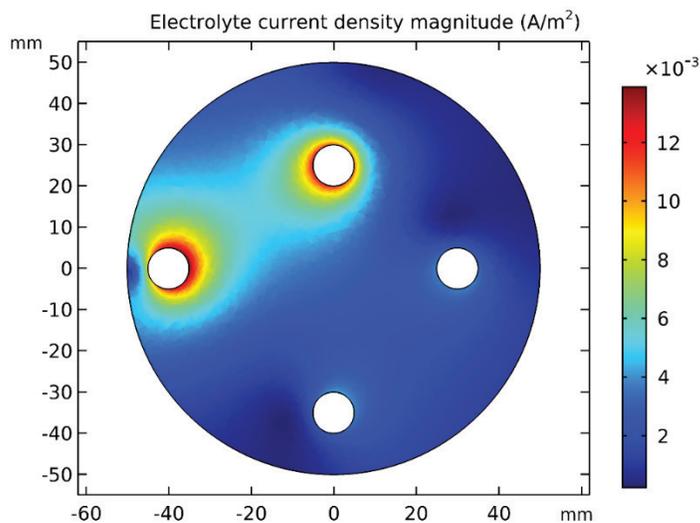


Figura 7. Valores de la magnitud de la densidad de corriente en el electrolito, sobre un plano horizontal del concreto reforzado ($z = 50$ mm).

En la figura 7 se brinda la magnitud de la densidad de corriente en el electrolito, en plano horizontal $z = 50$ mm. En el gráfico de figura 8 se muestra la densidad de corriente de la oxidación (o de corrosión) del Fe , para todas las varillas metálicas con su posición desde la superficie exterior. Las interfaces donde se calcula la corriente son líneas verticales opuestas al centro del espécimen de concreto y mirando hacia el externo. Por otro lado, la figura 9 reporta los resultados de la reducción del O_2 en las mismas interfaces. Se observa que la corriente de oxidación del Fe para la varilla a 5 mm de la superficie exterior es mayor que las de las restantes, pues se encuentra en una región carbonatada, donde los mecanismos electroquímicos de corrosión son más favorables.

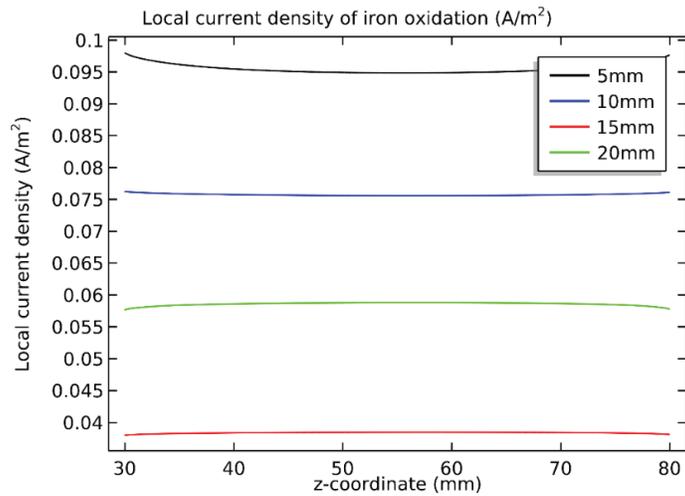


Figura 8. Densidad de corriente de oxidación del hierro en la interfaz superficie metálica-concreto, para las 4 varillas posicionadas a diferentes distancias de la superficie exterior.

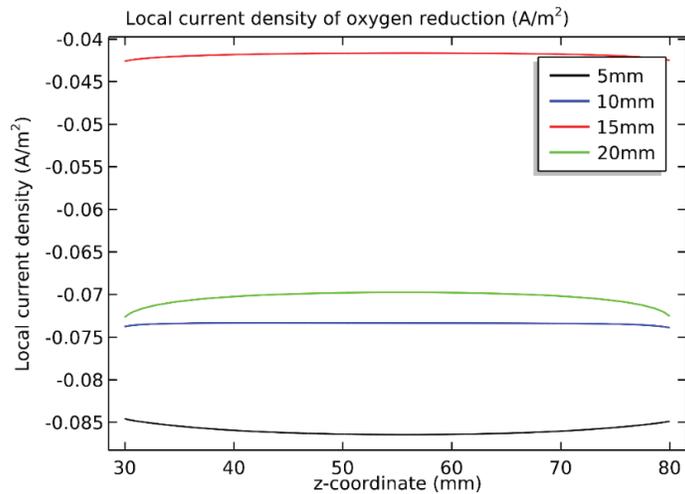


Figura 9. Densidad de corriente de reducción del oxígeno en la interfaz superficie metálica-concreto, para las 4 varillas posicionadas a diferentes distancias de la superficie exterior.

Según el cuadro 2, las varillas, con excepción del refuerzo puesto a 20 mm del exterior, se caracterizan por una corriente de corrosión que decrece con la profundidad de estas. Los resultados de la figura 9 muestran un comportamiento similar para la corriente de reducción del O_2 , es decir la densidad de corriente de reducción es mayor para la varilla más externa, donde además el O_2 difunde más rápidamente desde el ambiente. Los valores de las densidades de corrientes anódicas, para las dos varillas más externas, a 5 y 10 mm de profundidad, son superiores a las de las correspondientes corrientes catódicas. Estos resultados se analizan con del potencial de interfaz, es decir con la sobretensión anódica η . Cuando en algunas regiones el potencial ϕ_l es menor, allí η es mayor y así la corriente de corrosión dada por la ecuación de oxidación de Tafel. Para el caso del O_2 , la velocidad de reducción aumenta con su concentración en el electrolito y, por la ecuación catódica de Tafel, con los valores más negativos de η correspondientes a las interfaces colocadas en regiones donde el potencial ϕ_l es mayor.

Conclusiones

El modelo ha sido desarrollado incorporando datos cinéticos experimentales de las reacciones electroquímicas de los electrodos, que están en relación con el mecanismo de carbonatación en una cámara de carbonatación acelerada. En particular en el software se han usado datos del ensayo de polarización para las cuatro varillas colocadas a diferentes profundidades en el espécimen de concreto reforzado. El análisis de los resultados obtenidos ha indicado que a medida que la carbonatación es más intensa, como ocurre con las varillas más cercanas a la superficie externa, los potenciales de corrosión son más negativos y la intensidad de corriente presenta valores más grandes. Finalmente, a partir de los valores de potencial de corrosión, densidad de corriente de corrosión, pendientes anódicas y catódicas de la curva de Tafel, se han estimado las corrientes de intercambio anódicas y catódicas y simulado la corrosión de las varillas metálicas de las muestras de concreto reforzado.

Agradecimientos

Los autores agradecen la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR para el apoyo al proyecto 5401-1411-3001 “*Corrosión del concreto reforzado y DEgradación de sus propiedades MECánicas (CODE_MEC3): Estudio experimental y modelación de la degradación de propiedades mecánicas del concreto reforzado por causa de la corrosión*”.

Referencias

- [1] ASCE, “Report card for America’s infrastructure”, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2013.
- [2] X. Wang, M. Nguyen, M. Stewart, M. Syme and A. Leitch, “Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure”. *Part 1: Mechanisms, Practices, Modeling and Simulations - A Review*, CSIRO, Canberra, 2010.
- [3] W. Hayden, W.G. Moffatt and J. Wulff, “The structure and properties of materials”, Vol. III Mechanical Behavior, John Wiley and Sons, New York, 1965.
- [4] Tuutti K., “Corrosion of steel in concrete”, Swedish Cement and Concrete Institute RIT-Stockholm, 1982.
- [5] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas and M.N. Fardis, “A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation”, *American Inst. of Chemical Engineers*, 35, N.10, 1639-1650, 1989.
- [6] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas and M.N. Fardis, “Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem”, *Chemical Engineering Science*, 46, N.5/6, 1333-1338, 1991.
- [7] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas and M.N. Fardis, “Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete”, *ACI Materials Journal*, 88, N.2, 186-196, 1991.
- [8] V.G. Papadakis, M.N. Fardis and C.G. Vayenas, “Hydration and carbonation of pozzolanic cement”, *ACI Materials Journal*, 89, N.2, 119-130, 1992.
- [9] V.G. Papadakis, M.N. Fardis and C.G. Vayenas, “Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation”, *Materials and Structures*, 25, 293-304, 1992.
- [10] J.M. Chi, R. Huang and C.C. Yang, “Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method”, *Journal of marine science and technology*, 10, N.1, 14-20, 2002.
- [11] N. Zhiguon and Y. Ri, “Experimental investigation of concrete carbonation under different conditions”, *Study of Civil Engineering and Architecture (SCEA)*, 2, N.4, 114-117, 2013.
- [12] T.P. Hills, F. Gordon, N.H. Florin and P.S. Fennell, “Statistical analysis of the carbonation rate of concrete”, *Cement and Concrete Research*, 72, 98-107, 2015.
- [13] S. Imperatore, Z. Rinaldi and C. Drago, “Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel bars”, *Construction and Building Materials*, 148, 219-230, 2017.
- [14] Jaśniok M. and Jaśniok T., Evaluation of maximum and minimum corrosion rate of steel rebars in concrete structures, based on laboratory measurements on drilled cores, *Procedia Engineering*, 193, 486-493, 2017.
- [15] Z.P. Bazant, “Physical model for steel corrosion in concrete sea structures”, *Journal of the structural division- Proceedings of the ASCE*, 105, n. ST6, 1137-1153, June 1979.

- [16] T. Maruya, K. Hsu, H. Takeda and S. Tangtermsirikul, "Numerical modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement", *Journal of advanced concrete technology*, 1, N.2, 147-160, 2003.
- [17] B. Huet, V. L'Hostis, G. Santarini, D. Feron and H. Idrissi, "Steel corrosion in concrete: deterministic modeling of cathodic reaction as a function of water saturation degree", *Corrosion Science*, 49, 1918-1932, 2007.
- [18] P. Dangla and W. Wridi, "Rebar corrosion in carbonated concrete exposed to variable humidity conditions. Interpretation of Tuutti's curve", *Corrosion Science*, 51, 1747-1756, 2009.
- [19] R.R. Hussain and T. Ishida, "Development of numerical model for FEM computation of oxygen transport through porous media coupled with micro-cell corrosion model of steel in concrete structure", *Computers and Structures*, 88, 639-647, 2010.
- [20] M.I. Prieto, A. Cobo, A. Rodriguez and V. Calderón, "Corrosion behavior of reinforcement bars embedded in mortar specimens containing ladle furnace slag in partial substitution of aggregate and cement", *Construction and Building Materials*, 38, 188-194, 2013.
- [21] T.T.H. Nguyen, B. Bary and T. de Larrard, "Coupled carbonation-rust formation-damage modeling and simulation of steel corrosion in 3D mesoscale reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, 74, 95-107, 2015.
- [22] R.A. Robayo-Salazar, A.M. Aguirre-Guerrero and R. Mejia de Gutierrez, "Carbonation-induced corrosion of alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan", *Construction and Building Materials*, 232, 117189, 2020.
- [23] N. Murer, N. Missert and R. Buchheit, "Towards the modeling of microgalvanic corrosion in aluminum alloys: the choice of boundary conditions", *Proceedings of the Comsol Users Conference*, Boston (USA), 2008.
- [24] C.Y. Kim and J.K Kim, "Numerical analysis of localized steel corrosion in concrete", *Construction and Building Materials*, 22, 1129-1136, 2018.
- [25] M. Jaśniok and A. Zybura, "Modeling the carbonated concrete realkalization", *Journal of civil engineering and management*, 15, N.2, 159-168, 2009.
- [26] P. Ghods, K. Karadakis, O.B. Isgor and G. McRae, "Modeling the chloride-induced corrosion initiation of steel rebar in concrete", *Proceedings of the Comsol Conference 2009 Boston*, Boston, Ma, 2009.
- [27] L.T.N. Dao, V.T.N. Dao, S.H. Kim and K.Y. Ann "Modeling steel corrosion in concrete structures- Part 1: A new inverse relation between current density and potential for the cathodic reaction", *International Journal of Electrochemical Science*, 5, 302-313, 2010.
- [28] L.T.N. Dao, V.T.N. Dao, S.H. Kim and K.Y. Ann, "Modeling steel corrosion in concrete structures- Part 2: A unified adaptive finite element method for simulation of steel corrosion", *International Journal of Electrochemical Science*, 5, 314-326, 2010.
- [29] Y. Lu, E. Garboczi, D. Bentz and J. Davis, "Modeling the chloride transport in cracked concrete: a 3D image-based microstructure simulation", *Proceedings of the Comsol Conference 2012 Boston*, Boston, Ma, 2012.
- [30] M.G. Sohail, "Corrosion of steel in concrete: Development of an accelerated test by carbonation and galvanic coupling", PhD thesis, Université de Toulouse, 2013.
- [31] C. Cao, "3D simulation of localized steel corrosion in chloride contaminated reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, 72, 434-443, 2014.
- [32] I. Fernandez, J.M. Bairán and A.R. Marí, "3D FEM model development from 3D optical measurement technique applied to corroded steel bars", *Construction and Building Materials*, 124, 519-532, 2016.
- [33] A. Michel, M. Otieno, H. Stang and M.R. Geiker, "Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations", *Cement and Concrete Composites*, 70, 171-182, 2016.
- [34] M. Yu, H. Bao, J. Ye and Y. Chi, "The effect of random porosity field on supercritical carbonation of cement-based materials", *Construction and Building Materials*, 146, 144-155, 2017.
- [35] J. Zhang, X. Ling and Z. Guan, "Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement", *Construction and Building Materials*, 132, 487-499, 2017.
- [36] W. Mai and S. Soghrati, "New phase field model for simulating galvanic and pitting corrosion processes", *Electrochimica Acta*, 260, 290-304, 2018.
- [37] F. Babaghayou, B. Zegnini and T. Seghier, "Numerical study and remediation of AC interference corrosion on neighboring pipelines", *Journal of Engineering Science and Technology*, 13, N.7, 2047-2064, 2018.

- [38] D. Boukhlef, D. Boughrara and H. Mohellebi, "Simulation of border deformation in corrosion system by coupling analytical solution and finite element method", *Journal of Materials and Engineering Structures*, 5, 267-277, 2018.
- [39] J. Xia, T. Li, J. Fang and W. Jin, "Numerical simulation of steel corrosion in chloride contaminated concrete", *Construction and Building Materials*, 228, 116745, 2019.
- [40] C. Liu and R.G. Kelly, "A review of the application of finite element method (FEM) to localized corrosion modeling", *Corrosion Journal Org.*, 75, Issue 11, 1285-1299, 2019.
- [41] N. Seigneur, E. Kangni-Foli, V. Lagneau, A. Dauzeres, S. Poyet, P. Le Bescop, E. L'Hopital and J.B. d'Espinose de Lacaillerie, "Predicting the atmospheric carbonation of cementitious materials using fully coupled two-phase reactive transport modelling", *Cement and Concrete Research*, 130, 105966, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105966>
- [42] P. Liu, Z. Yu and Y. Chen, "Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment", *Cement and Concrete Composites*, 114, 103736, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103736>
- [43] Y. Yu, W. Gao, A. Castel, A. Liu, Y. Feng, X. Chen and A. Mukherjee, "Modelling steel corrosion under concrete non-uniformity and structural defects", *Cement and Concrete Research*, 135, 106109, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106109>
- [44] D.A. Jones, "Principles and prevention of corrosion", 2nd Ed., Macmillian Publishing Company, New York, 1992.
- [45] B. Chiné, R. Jimenez and R. Cuevas, "Corrosión del concreto reforzado y DEgradación de sus propiedades MECánicas (CODE_MEC2): Etapa 2 Estudio experimental y modelación computacional de la carbonatación y corrosión del concreto reforzado", código 1490020, Informe Final, Dirección de Proyectos VIE, ITCR, 2021.
- [46] Comsol AB, *Corrosion Module*, User's Guide, Version 5.4, 2018.

Comparación experimental de anemómetros de copas

Experimental comparison of cup anemometers

Maximino Jiménez-Ceciliano¹, Gustavo Richmond-Navarro²

Fecha de recepción: 3 de febrero, 2023

Fecha de aprobación: 6 de junio, 2023

Jiménez-Ceciliano, M; Richmond-Navarro, G. Comparación experimental de anemómetros de copas³. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 65-76.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6620>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: maxjimenez@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7222-9961>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: grichmond@tec.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

3 Los autores aquí firmantes están de acuerdo con la versión final de este documento y hacen constar que la conceptualización, preparación y corrección del artículo se realizó según la siguiente distribución: MJC 85%; GRN 15%.

Palabras clave

Anemómetro de copas; análisis de varianza; túnel de viento; velocidad del viento; calibración.

Resumen

Debido a que la potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento, esta velocidad usualmente se convierte en el factor más importante para determinar la potencia de una turbina eólica. Por tanto, la incertidumbre relacionada con los anemómetros ha sido investigada a fondo, buscando disminuir el error involucrado en la medición. En este trabajo se determina si un grupo de anemómetros comerciales de copas tienen medias que no difieren estadísticamente entre sí, utilizando varios túneles de viento disponibles y un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad de referencia. En algunos escenarios, se encuentra una relación lineal entre la medición de referencia y el valor medido por los anemómetros de copas, con un factor de corrección que depende de la velocidad del viento. En otros casos hubo algunos comportamientos atípicos, los cuales varían de una velocidad a otra, lo que hace suponer que esto es debido a factores externos al anemómetro. Esta suposición se refuerza por análisis de varianza y comparaciones de Tukey realizadas para los anemómetros a diferentes velocidades. En otros escenarios se encontró que, a pesar de obtener medias que no son estadísticamente iguales, el grupo de anemómetros entregó resultados en un rango que cae dentro de la incertidumbre declarada para el equipo. Se concluye que los resultados obtenidos no son suficientes para determinar si los anemómetros son estadísticamente equivalentes o no, pero si es posible observar que ninguno de los equipos analizados presenta un nivel de error que lo distinga del resto.

Keywords

Cup anemometer; analysis of variance; wind tunnel; wind velocity; calibration.

Abstract

Since wind power is proportional to the cube of wind speed, wind speed usually becomes the most critical factor in determining the power of a wind turbine. Therefore, the uncertainty related to anemometers has been thoroughly investigated, seeking to decrease the error involved in the measurement. This work determines whether a group of commercial cup anemometers has means that do not differ statistically from each other, using different wind tunnels and a hot-wire anemometer to measure the reference velocity. In some scenarios, a linear relationship is found between the reference measurement and the cup anemometers one, with a correction factor depending on the wind speed. In other cases, there were atypical behaviors, which vary from one speed to another. It is assumed that external factors must cause the described abnormal behaviors. This assumption is reinforced by analyzing the variance and performing Tukey comparisons for the anemometers at different speeds. In other scenarios, it was found that, despite obtaining means that are not statistically equal, the group of anemometers delivered results in a range that falls within the stated uncertainty for the equipment. It is concluded that the results obtained are not sufficient to determine if the anemometers are statistically equivalent or not, but it is possible to observe that none of the analyzed equipment presents an error level that distinguishes it from the rest.

Introducción

Las energías renovables han tenido un aumento del 15 % entre 2006 y 2015 [1]. Entre ellas, la energía eólica representa el 25% de la capacidad instalada en todo el planeta [2]. Para determinar la potencia en el viento, es necesario medir su velocidad, en efecto, esta potencia es proporcional a la tercera potencia de la velocidad del viento, por esta razón es de suma importancia medir de manera adecuada esta variable.

Se puede afirmar que los anemómetros, equipos que miden la velocidad del viento, se pueden agrupar en dos categorías, los calibrados y los no calibrados. En el caso de los anemómetros no calibrados, la incertidumbre de las mediciones aumenta debido a que la función de transferencia que gobierna la relación entre la señal eléctrica generada por el anemómetro y la velocidad del viento correspondiente es dada por el fabricante. Esta función de transferencia es creada con base en el diseño original del anemómetro y el comportamiento estadístico de una muestra de los anemómetros fabricados [3]. Por tanto, no refleja necesariamente el comportamiento de cada anemómetro particular, lo que si se obtiene mediante una prueba de calibración según los requerimientos de la norma IEC [4]. Esta misma norma prescribe el uso de anemómetros de copas para las mediciones de velocidad del viento, debido a su robustez y que han sido empleados por mucho tiempo con mucha investigación asociada a su uso y calibración.

Conocer la precisión de los anemómetros y asegurar esta con una calibración adecuada es de suma importancia tanto para los trabajos de investigación como para los anemómetros instalados en un aerogenerador ya que cualquier falencia en la medición de la velocidad del viento tendrá un gran impacto en los ingresos económicos [5]. En algunos estudios relacionados con la evaluación del recurso eólico no se hace mención de qué tipo de calibración es con la que cuentan los anemómetros utilizados, por ejemplo en [6], se realiza una investigación sobre la estimación del recurso eólico usando como base la velocidad del viento y modelos de curvas de potencia de aerogeneradores, donde se utilizaron datos diarios de velocidad del viento del cinco lugares diferentes de Nueva Zelanda, se realiza la estimación utilizando modelos de regresión lineal y no lineal, con y sin variables exógenas, con lo que se observó que el modelos no lineales superan a los lineales. En [7] se realiza un estudio la medición del coeficiente para un aerogenerador de eje vertical de 12 kW, donde se utilizó un anemómetro de copas para determinar la velocidad promedio del viento, con lo cual se determinan los parámetros necesarios para hacer funcionar la turbina en una relación de velocidad de punta óptima. Al momento de realizar una caracterización de un anemómetro es de suma importancia tomar en cuenta factores externos como los que se mencionan en [8] donde se estudió como afectan las condiciones ambientales en las calibraciones de los anemómetros, y con ello estimar los errores en la magnitud de la velocidad del viento debido a los cambios de las condiciones ambientales en las que se desarrolló previamente la calibración, En [8] se analizaron 9 diferentes anemómetros con la ayuda de un túnel de viento S4 del Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva" en la Universidad Politécnica de Madrid (IDR/UPM) , y se logró determinar que las constantes de calibración de transferencia de estos equipos son afectadas por los cambios de la densidad del aire. Además, existen factores de interferencia entre los límites del túnel, los rotores de los anemómetros y sus sistemas de montajes que pueden introducir un sesgo significativo en los resultados de la calibración [9].

En [10] se estudia el efecto de la geometría del rotor en la función de transferencias del anemómetro de copas de una forma experimental y analítica llevados a cabo en el instituto IDR/UPM, en este se determina que la función de transferencia se ve afectada principalmente por la relación entre el radio de las copas y el radio de rotación del centro de las copas.

Son múltiples parámetros los que se deben de tomar en cuenta, para lograr una calibración adecuada en los anemómetros de copas, en [11] se desarrolló un calibrador de anemómetro totalmente automático destinado a realizar calibraciones rápidas y precisas con el fin de satisfacer la creciente demanda y los estrictos requisitos de la industria eólica, el instrumento utiliza un conjunto amplio de diferentes sensores e instrumentación, controla el túnel de viento, realiza todo el procesamiento de datos y cálculos necesarios para que un usuario si experiencia pueda llevar acabo la calibración con una notable precisión. Además, en la actualidad existen empresas las cuales ofrecen el servicio de calibración de los anemómetros como [12] y [13] las cuales son certificadas por MEASNET (Red internacional de medidas armonizadas y reconocidas en energía eólica) y Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS-Organismo de acreditación alemán) respectivamente.

En el presente trabajo se muestra una validación experimental de la homogeneidad estadística de un grupo de anemómetros de copas, realizada sin equipos certificados, con el objetivo de determinar si alguno del lote de anemómetros presenta un comportamiento notablemente diferente del resto, o bien si todos operan dentro del rango declarado por el mismo fabricante.

Materiales y métodos

Primero, se realizaron pruebas sobre un grupo de diez anemómetros de copas del fabricante Davis, empleando un *datalogger* Envoy 8X y el software Weather Data Transfer Utility; el mismo tipo de equipos que se encuentran en literatura de medición de potencial eólico [14]. Se empleó un túnel de viento con un ventilador axial de velocidad variable y además un túnel de viento con un ventilador centrífugo, operado a velocidad fija. Los anemómetros en este caso se colocaron a la salida de los túneles de viento, pues sus áreas de sección transversal no permiten colocar los anemómetros dentro de los túneles.

Segundo, se realizaron pruebas sobre dos anemómetros de copas del fabricante Inspeed, modelo Vortex, distintos del lote anterior. Se empleó un anemómetro de hilo caliente como velocidad de referencia. Las pruebas se realizaron con los mismos dos túneles de viento del caso anterior, pero en este caso variando la velocidad de ambos. Una vez más los anemómetros se colocaron a la salida del túnel de viento.

En el cuadro 1 se presenta un resumen de los ensayos realizados y las variables de cada caso. La descripción detallada de las condiciones específicas de cada prueba se brinda en las subsecciones siguientes.

Cuadro 1. Descripción de los tres ensayos.

Ensayo	Anemómetros	Fabricante	Turbo máquina	Distancias desde el ventilador	Velocidad de rotación o porcentaje del voltaje máximo en el motor
1	A, B, C, D, E, F, G, H, I, NUEVO	Davis	Túnel de viento axial	No aplica	32, 54, 74 y 100 %
			Túnel de viento centrífugo		1000 RPM
2	A, B	Inspeed	Túnel de viento axial		40, 70 y 100 %
			Túnel de viento centrífugo		1000, 1400 y 1800 RPM

La variabilidad de los equipos fue debido a la disponibilidad de estos, en el caso del lote de anemómetros Davis, no fueron comparados con los Inspeed debido a que, según las necesidades del proyecto, fueron instalados en las torres de medición antes de la llegada de los anemómetros Inspeed. Por esa razón los últimos dos anemómetros fueron probados de manera independiente y se optó por tener un anemómetro de hilo caliente de referencia.

En todos los casos las mediciones obtenidas fueron procesadas con el software Minitab mediante análisis de varianza y para las pruebas con túnel de viento la información fue agrupada mediante el método de Tukey y una confianza de 95%.

Siguiendo lo indicado en [15] se siguió en todo caso el principio de aleatorización, para dar validez a las pruebas estadísticas que se realizan. En algunos casos donde fue posible se siguió también el principio de repetición, entendido como ejecutar más de una vez una combinación de factores. Adicionalmente, se indica que para el caso de los anemómetros Davis, se trata de una tecnología reportada en literatura previa [16].

Ensayo #1 Pruebas de anemómetros Davis con túneles de viento axial y centrífugo

Los anemómetros sujetos a pruebas fueron del tipo de copas, modelo 6410, miden la velocidad del viento en el rango de 0,4 m/s a 80 m/s con una precisión de ± 1 m/s, una resolución de 0,1 m/s y un valor umbral de 0,4 m/s. Fueron identificados con letras de la A hasta la J. Luego el anemómetro rotulado como J, que fue reemplazado y se rotuló como "NUEVO" para diferenciarlo del resto. El grupo de ensayos realizado fue realizado con dos túneles de viento. El primer túnel con un ventilador axial, potencia de $\frac{1}{4}$ hp, dimensiones del ducto: diámetro interno 5,125 in., longitud 47 in., velocidad de rotación variable gobernando el voltaje de operación del motor. Las pruebas se realizaron con porcentajes de voltaje de 32%, 54%, 74% y 100%. El segundo túnel con un ventilador centrífugo, potencia de 1 Hp, velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM) entre 1000 y 1800, dimensiones del ducto: longitud 67 in., diámetro 8 in. Las pruebas se realizaron con el equipo operando a 1000 RPM. En la figura 1 se muestran ambos túneles de viento.



Figura 1. Túneles de viento de viento: axial (izquierda) y centrífugo (derecha)

La colocación de los anemómetros respecto al túnel de viento se muestra en la figura 2. Se tomaron datos con una frecuencia de muestreo de 10 s durante 5 minutos en para cada velocidad, con el *datalogger* Envoy 8X del fabricante Davis.

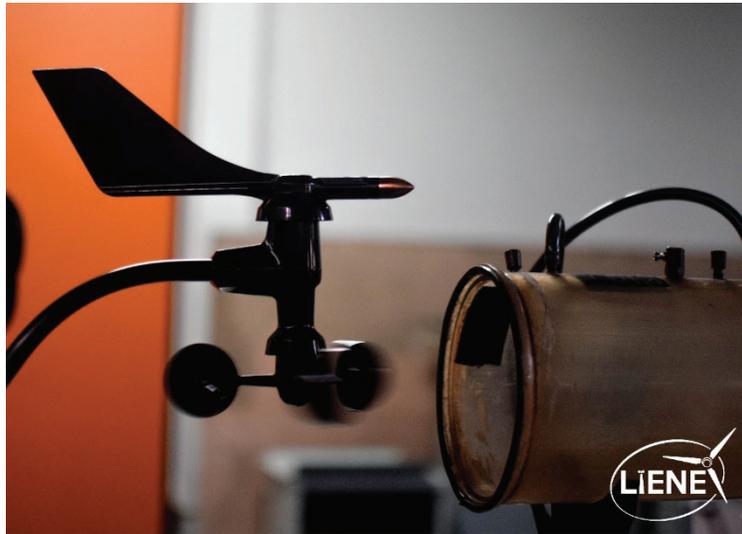


Figura 2. Anemómetro Davis siendo probado en el túnel de viento axial.

Ensayo #2 Pruebas de anemómetros Inspeed con túneles de viento axial y centrífugo

El segundo grupo de ensayos fueron realizados sobre dos anemómetros de copas que se rotularon como A y B, distintos del lote anterior, marca Inspeed modelo Vortex, los cuales miden en un rango de velocidades entre 2,2 y 55,9 m/s sin precisión declarada por el fabricante y con una resolución de 0,1 m/s. Ambos túneles tuvieron un tiempo de calentamiento de 15 minutos antes de iniciar el proceso de pruebas. El montaje en el túnel de viento centrífugo se muestra en la figura 3. Se buscó que el poste de medición no interfiriera con el flujo. También que el eje del anemómetro coincidiera con el eje del túnel y que su centro estuviera alineado con el centro del túnel.

En esta ocasión las mediciones se compararon con un valor referencia mediante un anemómetro de hilo caliente, marca Exttech modelo 407123. Tanto los anemómetros de copas como el de hilo caliente se colocaron a una distancia fija del túnel de viento y se varió la velocidad en los túneles. En el caso del túnel centrífugo se operó a 1000, 1400 y 1800 RPM. El túnel de viento axial se operó a voltajes de 40%, 70% y 100%. Los datos se recolectaron con un software que se instala directamente en un computador. Del mismo modo los anemómetros se conectan de forma directa al computador, sin un *datalogger* externo. La frecuencia de muestreo fue de 1 minuto y cada combinación se probó durante 10 minutos.



Figura 3. Anemómetro Inspeed siendo probado en el túnel de viento centrífugo.

Resultados y discusión

Ensayo #1 Pruebas de anemómetros Davis con túneles de viento axial y centrífugo

Las mediciones obtenidas en todas las combinaciones realizadas se muestran en la figura 4. Donde se realizaron algunas repeticiones al azar para cada velocidad de los túneles de viento. Se observa que con el túnel centrífugo a 1000 RPM el comportamiento fue similar en todos los anemómetros. La segunda tendencia con mayor similitud ocurre con 32% de voltaje en el túnel axial. Los otros resultados con el túnel axial muestran diferencias importantes para algunos anemómetros. Como no hubo réplicas del experimento completo, se desconoce si hubo efecto de factores externos.

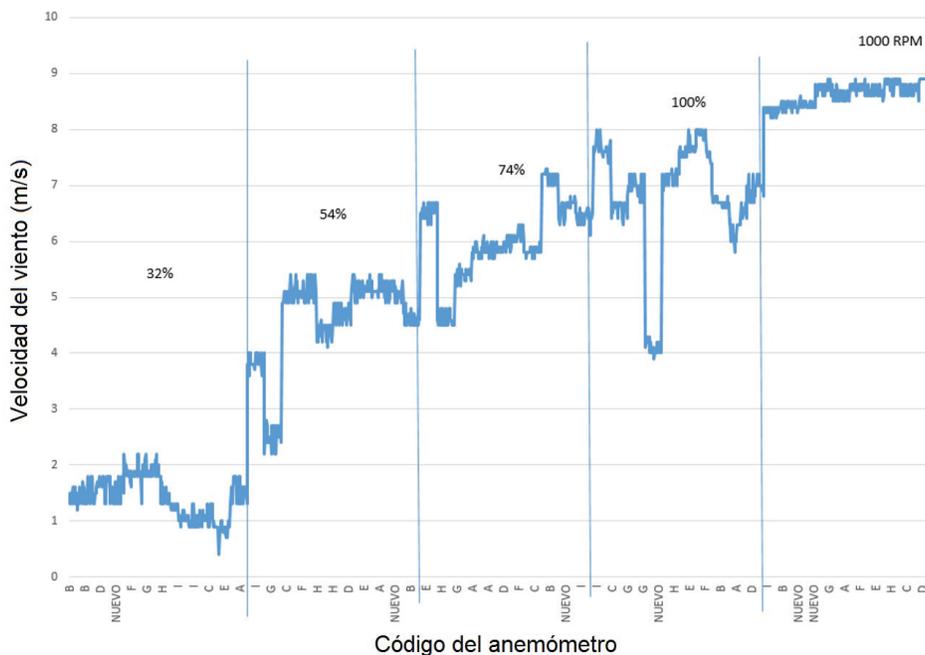


Figura 4. Velocidades medidas por los anemómetros Davis con el ventilador axial y centrífugo.

Al realizar el análisis de varianza y aplicar el método de Tukey para las pruebas realizadas en el túnel de viento axial con voltajes de 32%, 54%, 74% y 100% del voltaje de operación se obtienen los resultados mostrados en la figura 5.

Para el caso de 32% las medias de D, NUEVO, A, y B no difieren estadísticamente entre sí. Los datos de B, D y NUEVO fueron tomados de forma consecutiva según se puede observar en la figura 5. Las medias de F y G no difieren estadísticamente entre ellas, pero sí con el resto, además estos datos también fueron tomados de forma consecutiva. Las medias de C e I no difieren estadísticamente entre ellas, pero sí con el resto, una vez más estos datos fueron tomados de forma consecutiva. Estadísticamente el Anemómetro E es diferente a los demás.

Al operar el ventilador axial con un voltaje de 54 % las medias de A, E, F, NUEVO y C indican que miden estadísticamente igual entre ellos. Todos sus datos no fueron recolectados de manera consecutiva. Las medias de D, B, H, I y G indican que miden estadísticamente diferentes a los demás.

Al aplicar el mismo procedimiento para un voltaje de 74 % las medias de B, I, F, G y H miden estadísticamente diferentes a los demás, las medias de D, A y C miden estadísticamente igual entre sí y las medias de NUEVO y E miden estadísticamente igual entre sí.

Para el caso de 100% nuevamente algunos anemómetros son similares entre si pero distintos al resto, no obstante, en cada caso la tendencia cambia en cuanto a cuáles son los equipos distintos del resto. Vale la pena indicar que, a pesar de que estadísticamente los resultados no son iguales puesto que la varianza disminuyó para cada anemómetro; todos los resultados están entre 8,3 y 8,9 m/s con el túnel de viento axial al 100% del voltaje. Esto es un rango de 0,6 m/s que es menor al ± 1 m/s declarado por el fabricante.

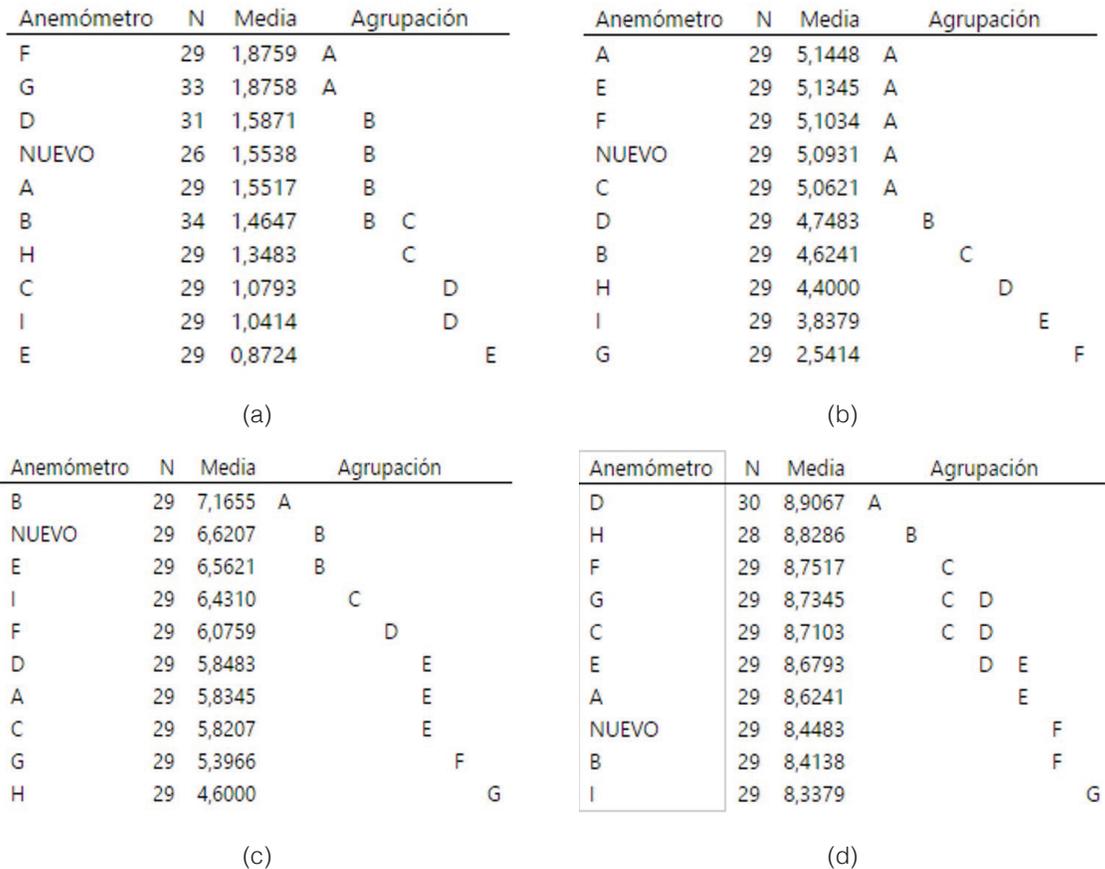


Figura 5. Método de Tukey para las mediciones del ventilador axial al 32% (a), 54% (b), 74% (c) y 100% (d).

A la luz de estos resultados se debe tener en mente que existe una diferencia entre significancia estadística e importancia práctica, pues de acuerdo con [15] es posible concluir que dos tratamientos son diferentes estadísticamente pero no necesariamente representan una diferencia que en la práctica sea importante. Tal es el caso de estos resultados donde el rango de resultados está dentro del margen de error propio de los equipos.

Un consolidado de los resultados se presenta en la figura 6 que muestra la gráfica de interacción para velocidad para las medias de los datos de todos los anemómetros. Aquí se puede ver que hubo algunos comportamientos atípicos. El hecho de que los anemómetros con comportamientos atípicos varíen de una velocidad a otra hace suponer que esto es debido a factores externos al anemómetro.

Finalmente, al intentar comprobar la normalidad de los residuos mediante la prueba correspondiente, se encontró que los residuos no son normales.

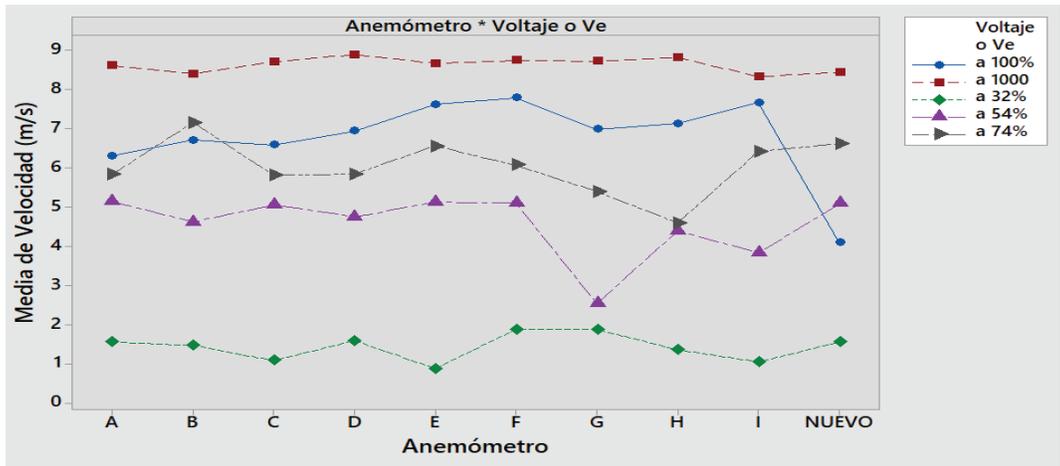


Figura 6. Medias de velocidad (Ve representa velocidad en RPM).

Ensayo #2 Pruebas de anemómetros Inspeed con túneles de viento axial y centrífugo

Los resultados de las mediciones realizadas se muestran en la figura 7 para los anemómetros A y B, así como los datos registrados por el anemómetro de hilo caliente que fue colocado luego de cada medición tomada con los anemómetros de copas. Dado que el área de sección del anemómetro de copas es comparable con la sección transversal del túnel de viento, se genera un efecto de bloqueo que supera el máximo de 10% aceptable [17]. Esto no ocurre con el anemómetro de hilo caliente que tiene una sección muy pequeña en relación al túnel de viento. Por esta razón en la figura 7 existe una diferencia considerable entre las velocidades registradas por los anemómetros Inspeed y el de hilo caliente. Siendo mayor, razonablemente, lo registrado por el hilo caliente que no bloquea el flujo.

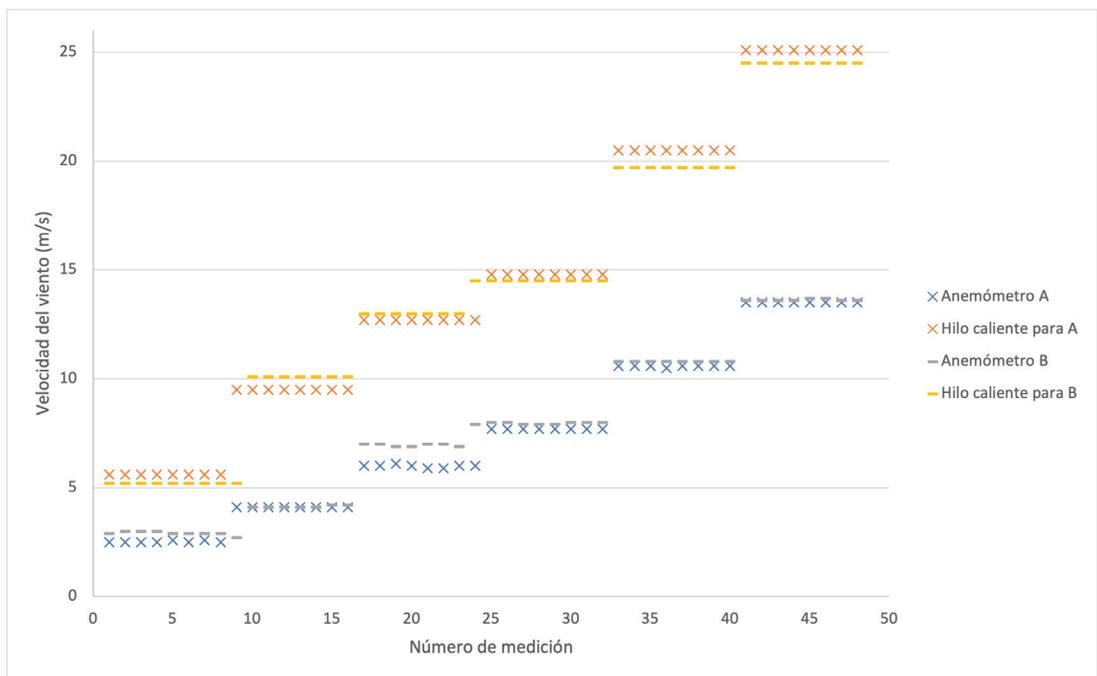


Figura 7. Mediciones de los anemómetros Inspeed e hilo caliente.

En este caso, dado que se trabaja con una velocidad de referencia, el análisis con Minitab permitió obtener las ecuaciones de regresión (1) y (2). Donde V representa la velocidad del viento de referencia en función de la medición del anemómetro de copas A, indicada como V_A o bien del anemómetro B indicado como V_B .

$$V = 2,196 + 1,6897 V_A \quad (1)$$

$$V = 1,574 + 1,6897 V_B \quad (2)$$

A pesar de que las diferencias entre las velocidades de referencia y las velocidades medidas por los anemómetros varían, entre más baja es la velocidad del viento la diferencia es menor. De modo que, aunque hay una diferencia respecto de la velocidad de referencia, existe una relación lineal entre la referencia y el valor medido por los anemómetros de copas, con un factor de corrección que es lo esperado. Aunado a lo anterior, la pendiente de la recta de mejor ajuste de las ecuaciones (1) y (2) son idénticas, tal cual se espera al ser los anemómetros A y B idénticos.

Conclusiones

Luego de realizar un análisis del comportamiento de un grupo de anemómetros para determinar si poseen un comportamiento similar o distinto entre ellos, es posible llegar a las siguientes conclusiones.

1. Al probar los anemómetros de forma externa en túneles de viento didácticos, se obtienen comportamientos atípicos, pero estos comportamientos varían de una velocidad a otra lo que hace suponer que se deben a factores externos al lote de anemómetros.
2. Mediante las comparaciones de Tukey se muestra que los grupos de anemómetros cuyas medias son estadísticamente equivalentes entre sí, varían de una velocidad a otra, lo que impide identificar de forma inequívoca a algún anemómetro distinto del resto.
3. El análisis con el ventilador centrífugo produjo el rango de mediciones más cerrado de todas las velocidades en este experimento. A pesar de que las medias no son estadísticamente equivalentes, puesto que la varianza disminuyó para cada anemómetro, todos están en un rango de 8,3 m/s a 8,9 m/s.
4. Las medias de los anemómetros ensayados se encuentran dentro de un rango menor a 1 m/s en los casos que se usó el túnel de viento centrífugo, es decir, la medición obtenida con los equipos evaluados mantiene una incertidumbre menor a $\pm 0,5$ m/s, en concordancia con lo declarado por el fabricante.

La información obtenida en este estudio indica que se requiere un espacio más controlado, como lo es un túnel de viento donde se puedan colocar los anemómetros internamente, para obtener un menor efecto de los posibles agentes externos.

A pesar de las limitaciones, se logró identificar que ninguno de los equipos probados mostró una tendencia o sesgo de manera sostenida en las diferentes pruebas. Por tanto, se puede afirmar que este método de pruebas es una alternativa válida, al menos para descartar equipos dañados, en casos de no disponer de un túnel de viento que pueda certificar el funcionamiento de los anemómetros.

Agradecimientos

A los estudiantes del Instituto Tecnológico de Costa Rica Christopher Arrieta Sánchez y Edward Gómez Chaves, asistentes del Laboratorio de Investigación en Energía Eólica LIENE.

Referencias

- [1] C. Washburn y Romero M.Pablo, «Measures to promote renewable energies for electricity generation in Latin American countries,» *Energy Policy*, vol. 128, pp. 212-222, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.059>
- [2] IRENA, «IRENA International Renewable Energy Agency,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies>. [Último acceso: 18 June 2020].
- [3] R. V. Coquilla, J. Obermeier y B. R. White, «Calibration Procedures and Uncertainty in Wind,» *WIND ENGINEERING*, vol. 31, nº 5, 2007. <https://doi.org/10.1260/030952407783418720>
- [4] International Standard, «IEC-61400-12-1. Wind Turbines. Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines,» p. Annex F “Cup anemometer calibration procedure”, 2005-2012.
- [5] E. R. Millan, J. Cubas y S. Pindado, «Studies on Cup Anemometer Performances Carried out at IDR/UPM Institute. Past and Present Research,» *Energies*, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10111860>
- [6] E. Lydia, K. Suresh, I. Selvakumar y Prem Kumar Edwin, «Wind resource estimation using wind speed and power curve models,» *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 425-434, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.045>
- [7] J. Kjellin, F. Bülow, S. Eriksson, P. Deglaire, M. Leijon y H. Bernhoff, «Power coefficient measurement on a 12 kW straight bladed vertical axis wind turbine,» *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 3050-3053, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.031>
- [8] S. Pindado, A. Sanz y A. Wery, «Deviation of Cup and Propeller Anemometer Calibration Results with Air Density,» *Energies*, 2012. <https://doi.org/10.3390/en5030683>
- [9] H. Ole, S. Ole y K. Leif, «Wind tunnel calibration of cup anemometers,» de *WINDPOWER 2012 Conference*, Atlanta, 2012.
- [10] S. Pindado, J. Cubas y F. Sorribes, «The Cup Anemometer, a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute,» *Sensors*, 2014. <https://doi.org/10.3390/s141121418>
- [11] L. Fernando y R. Duro, «A virtual instrument for automatic anemometer calibration with ANN based,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003. <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.814703>
- [12] NRGSystems, «NRGSystems Solar and Wind Solutions,» 23 April 2015. [En línea]. Available: <https://www.nrgsystems.com/news-media/u-s-based-wind-tunnel-achieves-measnet-certification>. [Último acceso: 22 June 2021].
- [13] WIND, «WIND Ammonit Wind Tunnel,» [En línea]. Available: <https://ammonit-windtunnel.com/kalibrierung-und-klassifizierung-von-anemometern/>. [Último acceso: 22 June 2021].
- [14] L. Bilir, M. Imir, Y. Devrim y A. Albostan, «An investigation on wind energy potential and small scale wind turbine performance at _Incek region – Ankara, Turkey,» *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 910-923, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.017>
- [15] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Vara Salazar, «Análisis y diseño de dxperimentos,» México, Mc Graw Hill, 2008, p. 545.
- [16] A. Bowen, N. Zakay y Ives R, «The field performance of a remote 10 kW wind turbine,» *Renewable Energy*, vol. 28, nº 1, pp. 13-33, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00011-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00011-3)
- [17] J. B. Barlow y W. H. Rae Jr, «Low speed wind tunnel testing,» *INCAS Bulletin*, vol. 7, nº 1, p. 133, 2015.

Evaluación del impacto sonoro del tren urbano y sus implicaciones sociales: análisis del tramo San José – Tres Ríos

Evaluation of the sound impact of the urban train and its social implications: analysis of the San José – Tres Ríos section

Nidia Cruz-Zúñiga¹, Allan Rojas-Ramírez²

Fecha de recepción: 16 de enero, 2023
Fecha de aprobación: 17 de mayo, 2023

Cruz-Zúñiga, N; Rojas-Ramírez, A. Evaluación del impacto sonoro del tren urbano y sus implicaciones sociales: análisis del tramo San José – Tres Ríos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 77-87.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6559>

- 1 Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: nidia.cruz@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4416-0626>
- 2 Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: allan.rojasramirez@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4317-3871>

Palabras clave

Impacto sonoro; mapas de ruido; transporte urbano de pasajeros; tren; zonificación urbana.

Resumen

El impacto sonoro del tren urbano de pasajeros es un fenómeno poco estudiado en el país y en América Latina. En el caso particular de Costa Rica, el tren fue reactivado sin considerar aspectos como el desarrollo del uso del suelo en los alrededores, por lo que existe una potencial afectación a la población que durante años vivió al lado de líneas férreas inactivas. La metodología seguida combinó mediciones de campo en puntos clave para cada estación estudiada, el uso de sistemas de información geográfica y sondeos de opiniones de las poblaciones implicadas mediante encuestas a personas usuarias, vecinas y comerciantes en el área de influencia directa (AID). Los resultados evidencian que los niveles de contaminación sónica producidos en el evento de llegada y salida del tren en las estaciones del ramal San José – Tres Ríos sobrepasan los permitidos por ley en al menos un 10% del tiempo. Además, al entrelazar los datos de campo con el estudio de percepción se cuantificó el efecto sensorial del ruido. Los principales hallazgos evidencian que en general todas las poblaciones sienten un impacto sonoro significativo que altera su calidad de vida y la calidad del servicio; que las personas que viven o trabajan en puntos más cercanos a las estaciones han sentido una disminución de la calidad acústica y que propiciar un cambio en la planificación orientada a este medio de transporte puede ser una solución al problema.

Keywords

Sound impact; noise maps; urban passenger transport; train; urban zoning.

Abstract

The sound impact of the urban passenger train is a phenomenon little studied in the country and in Latin America. In the particular case of Costa Rica, the train was reactivated without considering aspects such as the development of land use in the surroundings, so there is a potential impact on the population that for years lived next to inactive railway lines. The methodology followed combined field measurements at key locations for each station studied, geographic information systems, and opinions of the populations involved through surveys applied to users, neighbors, and merchants in the area of direct influence (ADI). The results show that the levels of noise pollution produced in the event of arrival and departure of the train in the stations of the San José - Tres Ríos branch exceed those allowed by law in at least 10% of the time. In addition, by intertwining the field data with the perception study, the sensory effect of noise was quantified. The main findings show that in general all populations feel a significant sound impact that affects their quality of life and the quality of service; that the people who live or work in points closer to the stations have felt a decrease in the acoustic environmental quality and that promoting a change in planning oriented towards this means of transport can be a solution to the problem.

Introducción

Los sistemas de transportes son indispensables para la movilidad de las personas, en particular los trenes, pero muchas veces se piensa que estos tienen solo ventajas positivas, pues el grueso de la población ve sus beneficios, pero existe literatura que habla de los efectos colaterales que producen, en especial para aquellas personas que viven en sus inmediaciones [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. El principal objetivo del presente artículo es explicitar los impactos sonoros

que genera el tren urbano de pasajeros en Costa Rica, mediante un estudio de caso para el ramal San José – Tres Ríos. La metodología de abordaje es exploratoria, complementando las mediciones de campo con modelos teóricos y un estudio de las percepciones de las poblaciones cercanas al tren, esto último mediante un abordaje cuantitativo con un instrumento de consulta directa tipo encuesta. La innovación principal radica justamente en ese análisis de percepciones, pues no se encontraron referencias de estudios similares en el país.

La contaminación sónica o acústica se define como la presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, excesivas o molestas, que provocan incomodidad para el desarrollo de las actividades cotidianas o incluso daños en la salud a las personas cercanas [8]. El ruido, en todo tipo de actividades, representa un peligro y realmente no se ha valorado en su real dimensión. Poco se ha visto que las partes interesadas hayan determinado la urgencia de manejar programas de control del ruido; en la literatura es más común encontrar estudios de la influencia del ruido en la productividad o en espacios industrializados que en sistemas de transporte. El fenómeno del ruido es conocido por generar efectos negativos en las personas en sus actividades diarias [6]. Los altos niveles de ruido pueden generar efectos adversos auditivos y extra-auditivos [1] y ambos pueden ser muy dañinos para la salud comunitaria.

La predicción de la exposición al ruido permite cuantificar su afectación, para así tomar acciones para plantear soluciones reductoras del efecto negativo en las comunidades [5]. Específicamente en Estados Unidos han detectado efectos negativos sobre la salud asociados a cómo está organizado el sistema de transporte en diferentes ciudades; y cómo el ruido de este repercute directamente en la calidad de vida de las personas [4]. La bocina y la vibración que genera el tren al pasar por las vías férreas son las principales fuentes de generación de contaminación acústica, afectando severamente la población alrededor de las vías por donde transita el tren [1]. Las personas que viven en áreas cercanas a líneas ferroviarias son las que normalmente presentan problemas directos con respecto al ruido que se genera. Si bien el uso de trenes permite solucionar problemas de congestión y contaminación, presentan la desventaja de que genera bastante ruido y vibraciones. No obstante, en los últimos años se ha utilizado nuevas tecnologías para disminuir estos efectos [6]. El ruido se considera como un problema sanitario relevante, dado que la contaminación sónica es una de las más fáciles de producir. Estudios han demostrado que al exponerse a 50 - 60 decibeles se puede observar efectos vegetativos como la modificación del ritmo cardíaco; entre los 95 y 105 decibeles pueden existir espasmos o dilataciones de los vasos sanguíneos, alteraciones en la coordinación del sistema nervioso central, trastornos del sueño, estrés, entre otros [1], [9]. El ruido de los medios de transporte está entre los cuatro factores ambientales con mayor impacto en la salud [7], este nivel de contaminación puede atentar contra la salud emocional en las personas dado los altos niveles de estrés que provoca, de manera que la contaminación auditiva se vuelve un problema psico social para el ser humano. Según Clausen [3] “el ruido ferroviario afecta aproximadamente doce millones de personas durante el día y a nueve millones de personas durante la noche”.

Antecedentes del sistema de tren urbano en Costa Rica

No se ha encontrado, hasta el momento, en la literatura referencias que analicen las implicaciones que ha tenido evolución del tren urbano de pasajeros en el país. La realidad de su génesis (una vía férrea que era para transporte de carga muchas décadas atrás) hace que sea complejo de analizar los potenciales impactos. Dentro de las paradojas a analizar está el hecho de cómo se adaptó una demanda de transporte masivo al escenario de conflicto vial en el área metropolitana, con un sistema poco articulado y centrado en los vehículos privados.

Retomando los orígenes, en 1995, se ordenó el cierre del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), sustentado la decisión en el déficit presupuestario; ser un sistema anticuado, y que solo lo utilizaba un 3% de los costarricenses [10]. En 2005, por una crisis petrolera, el gobierno

de turno decidió reactivarlo para disponer del transporte de personas entre Pavas y Montes de Oca. Cinco años más tarde el servicio se extendió a Heredia, posteriormente, en 2011 conectó Belén con la capital y finalmente, en el 2014 a Cartago [10].

La presente investigación surgió de la inquietud de visibilizar cuáles son los impactos tras la reactivación del tren. En este sentido se trabajó con las personas que viven o tienen sus negocios en las inmediaciones, que pueden recibir sus impactos sin necesariamente sentir los posibles beneficios, y que vivieron el cambio en el entorno.

Materiales y métodos

Los resultados del presente artículo son parte de un proyecto de acción social más amplio, y presentan una de las aristas que consistió en realizar una evaluación del impacto sonoro del tren en la ruta del ramal San José – Tres Ríos, tocando parte de los cantones de Montes de Oca, Curridabat, La Unión.

El abordaje corresponde a un estudio exploratorio, que engrana la investigación desde dos líneas; una primera con mediciones directas de campo que permitiera tener datos concretos del impacto sonoro real en los alrededores de las estaciones del tren en estudio y una segunda, en paralelo y complementaria, el levantamiento de información de las percepciones de las diferentes poblaciones que interactúan con el tren, a saber: usuarios, vecinos y comerciantes. Si bien este esfuerzo no pretende subsanar toda el faltante de conocimiento sobre los impactos del servicio del tren en Costa Rica, representa un avance importante en la temática. El estudio de percepciones corresponde a un análisis cuantitativo y descriptivo de los datos obtenidos por medio de cuestionarios de carácter cerrado. Se realizó una tabla de operacionalización de las dimensiones de análisis claves, con el fin de fundamentar la estructura de cada uno de los tres distintos cuestionarios aplicados. Los cuestionarios indagaron datos adicionales más allá del impacto sonoro, aunque para el presente escrito se presentan solo los resultados relacionados con el tema abordado.

La metodología trató de acercarse a lo recomendado en la literatura, [11] que utiliza como herramienta de síntesis de esta información mapas de ruido, realizando un inventario de fuentes sonoras generadoras de molestias, identificando actividades con mayores índices de protestas por ruido y lo combina con encuestas a la población acerca. Los mapas de ruido son una herramienta que permite mapear el estado de contaminación acústica en una zona determinada. Esta herramienta tiene como objetivo la evaluación global de la exposición acústica, donde se establecen áreas críticas y se compara según el uso predominante del suelo.

Específicamente el abordaje en este caso contempla mediciones de campo del evento que genera el mayor impacto sonoro del proceso de movilización del tren, el cual se definió como la llegada y salida del tren a cada una de las estaciones. Esto debido a que, luego de una fase de observación de campo y de viajes de recorrido exploratorio en la línea en la que se realizó la investigación, se pudo determinar que estos eventos en la estación eran los que rompían la monotonía del trayecto y los que generaban mayores niveles de ruido. Como parte del proceso de definición metodología se realizaron levantamientos descriptivos de cada una de las estaciones a considerar, tomando en cuenta tipo y ubicación de los andenes, ubicación espacial de la línea con la demás infraestructura urbana existente y puntos de entrada y movilización de las personas dentro de cada estación en particular. Este primer material fue ordenado y procesado mediante sistemas de información geográfica para generar los mapas de trabajo en los que se definieron los puntos de medición como se explica a continuación.

Levantamiento y procesamiento de la información geoespacial

Considerando que la teoría de atenuación de ruido indica que el principal factor de atenuación es la distancia, se consideró esta como el punto de partida para definir el levantamiento de campo, para lo cual se definió un Área de Influencia Directa (AID) de 200 m a la redonda.

Dado que el ruido ambiental varía con el tiempo, normalmente su medición se realiza durante períodos de exposición específicos. Cuando se trata de eventos de ruido específicos como en este caso, la literatura recomienda que estos se midan únicamente durante su duración [12]. En este caso, las mediciones se realizaron con sonómetros digitales, utilizando la unidad de decibeles (dB), con la ponderación de frecuencia A, y la coordinación simultánea se realizó con comunicación celular entre los equipos que se encontraban en cada radial. Los equipos de medición eran de dos personas por punto de medición. La medición del evento iniciaba cuando se tenía la primera percepción de que se aproximaba el tren, la toma de datos fue cada 5 segundos, hasta el momento en que el tren ya se alejaba lo suficiente de la estación como para no percibir un aporte significativo de su sonido. Se montaron equipos de medición por evento, colocados para medición simultánea en tres distancias a saber: directamente en la estación, aproximadamente a 100 metros de distancia de la estación y luego a 200 metros de distancia. Para cada estación se definieron 4 ejes de medición, dos sobre la línea del tren propiamente y dos perpendiculares, lo más aproximado posible pero siempre medidos sobre la vía pública. El medidor de ruido se colocó a 1,5 m por encima nivel del suelo, las lecturas se tomaron en días sin lluvia ni niebla. Se anotó en las bitácoras de registro cuando había fuentes sonoras externas fuertes.

Las mediciones se realizaron durante al menos 3 días diferentes en cada uno de los horarios disponibles, para cada una de las estaciones en estudio, iniciando con los primeros trenes de las 6 de la mañana y finalizando con los trenes de las 6:30 de la tarde. Se debe considerar que en el ramal en estudio se tienen solo dos franjas horarias, la de la mañana de 6:00 a.m. a 8:50 a.m. y la de la tarde - noche de 3:00 p.m. a 8:30 p.m. Se excluyeron los horarios nocturnos por una situación de seguridad de las personas que realizaban las mediciones y por el peligro que aporta la oscuridad al estar cerca de recorrido del tren.

Se recomienda que para las mediciones sonoras se considere que el tiempo de medición sea de al menos una (1) hora; también indica que lo recomendable es realizar las mediciones de forma continua o con intervalos no menores a 15 minutos; se agrega que, para capturar la información necesaria, se deben realizar como mínimo 3 mediciones de 5 minutos cada una, para que los resultados sean representativos [13]. Estas recomendaciones fueron seguidas para definir las pautas de medición sonora y se cumplieron a cabalidad.

Posteriormente, con cada serie de datos del evento de llegada y salida del tren a la estación se realizaron estadísticas generales que permitieron evaluar los niveles sonoros reportados en campo. Para el análisis se acomodaron los datos por percentiles y se determinó el percentil 10 (nivel sonoro que se sobrepasa el 10% del tiempo, correspondiente a los niveles máximos registrados), el percentil 50 (nivel sonoro que se sobrepasa el 50% del tiempo, que puede considerarse como una media) y el 90 (nivel sonoro que se sobrepasa el 90% del tiempo, compatible prácticamente con el ruido ambiente de cada estación).

Con base en los datos encontrados se procedió a realizar una comparación con los niveles de sonido permitidos para las diferentes zonificaciones establecidas en el reglamento de Control de la Contaminación por Ruido (N° 39428-S). Para luego proceder a montar la información en un modelo gráfico (mapa de ruido) que permitió visualizar la distribución espacial del sonido asociada al evento de llegada – partida del tren urbano a cada estación. Los mapas de ruido o mapas sonoros son una técnica cartográfica que permite conocer las condiciones sonoras de una zona producto de un evento sónico particular; se trata de un sistema espacial donde tres

variables se ponen en relación: las dos dimensiones ortogonales que definen el plano y, los fenómenos representados, que aparecen como manchas que en este caso representan zonas con la misma intensidad de exposición sonora [14].

Determinación de tamaños de muestra para el estudio de percepciones

Para la selección de la muestra de usuarios se tomó como dato el número de pasajeros reportado por el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) [15], en el cual se contabiliza un total de 980 585 pasajeros al año 2019 para la línea en estudio. Con este dato, bajo un margen de error del 5%, y el 95% de confianza, se determina que la muestra representativa debe contar con un mínimo de 385 cuestionarios. La elección de los pasajeros a encuestar se hizo al azar en las estaciones de interés y se manejaron tres dimensiones de análisis: el perfil sociodemográfico, el perfil del usuario y la percepción de los usuarios.

Con el fin de concretar el tamaño de las otras dos muestras utilizó el catastro del área de influencia directa (AID) de 200 m a la redonda de cada una de las estaciones de tren. Con respecto a las poblaciones residentes, no se cuenta con datos concretos de la población total que habitaba en ese momento en el AID, en especial porque la población estudiantil que vive en las cercanías de las estaciones ligadas a alguna universidad cambia frecuentemente, por ende, en este caso se decidió tratar de alcanzar la mayor cantidad de encuestas posibles. Finalmente, para el caso de la consulta a locales comerciales, la consulta se realizó al encargado o dependiente principal que se encontrara en cada local en ese momento, tratando de que se lograra tener un censo de dicha población. Como material de apoyo se contó con el catastro de las áreas en estudio y se complementó con un levantamiento actualizado de usos del suelo detallado durante el mismo período del estudio. Se debe considerar que el sondeo de poblaciones se vio interrumpido por los protocolos del COVID 19 de la Universidad de Costa Rica, por lo que la muestra se tomó en dos años diferentes. Finalmente, la composición de las muestras alcanzada se evidencia en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tamaño de muestras alcanzados.

Año de sondeo	Cantidad de personas encuestadas		
	Residentes	Comerciantes	Usuarías
2019 – 2020	68	164	382
2022	168	72	120
TOTAL	236	236	502

Nota: de abril de 2020 a dic 2021, la UCR no permitió el trabajo de campo en contacto con personas.

El instrumento de consulta fue elaborado por los autores del presente artículo, y luego fue validado en la Estación del Atlántico, en el mes previo del inicio de la toma de datos.

Análisis espacial y de uso del suelo

Como parte de las investigaciones se generaron levantamientos exhaustivos de uso del suelo, donde se determinó la ocupación actual (2019 – 2020) de cada predio en el AID, y se clasificaron por tipo (residencial, comercial, baldío, institucional, mixto). En esta parte del estudio los levantamientos se hicieron entre otros motivos, para determinar zonas sensibles al impacto sonoro, por ejemplo, porque tenían predominancia de residencias, y centrar los esfuerzos en sondear a las personas que habitaban allí.

Posteriormente, para el análisis de los resultados se tomaron todos los insumos espaciales y se definieron los mapas de ruido, con el fin de ver si las zonas preliminarmente detectadas como sensibles estaban recibiendo un impacto significativo por el ruido generado. A las curvas extrapoladas por los SIG y que tienen igual nivel sonoro se les llamó isonoras, pues permiten tener un modelo espacial de descripción del evento que genera el impacto de forma más clara y en la interfaz gráfica, por lo que fácilmente se puede comparar con la normativa existente y reflejar zonas de potencial incumplimiento o puntos donde se puede estar generando mayor inconformidad. Según se indica la teoría, para control, la evaluación y medición del ruido se delimita mediante el uso de herramientas como estos mapas de ruido y sus respectivas derivaciones, además de bases de datos espaciales [15]; por ello la presente investigación toma como principal forma para presentar los resultados obtenidos este tipo de representaciones gráficas, atreviéndose a hacerlo para un evento que no es puntual, ya que la fuente del sonido se mueve en una línea hacia y desde el punto de interés.

Resultados

Niveles de exposición sonora medidos en campo

El impacto sonoro del tren resulta ser un reto de evaluación ambiental en el país, pues no se han realizado estudios específicos y tampoco existe una legislación específica para el tema. Los resultados de la presente investigación evidenciaron como realmente en los alrededores de las estaciones del tren (troncal San José – Tres Ríos) existe un grado elevado de exposición sonora, atenuado en alguna medida por la densidad de estructuras que existen en algunos sitios, como por ejemplo en el caso de la estación CFIA, donde las mediciones de campo a los 200 metros de distancia de la estación, y en los puntos situados entre las estructuras residenciales, reflejaron patrones de atenuación importantes (del rango de entre 10 a 15 dB menos que en la misma distancia medida en espacios abiertos).

En el material complementario se pueden visualizar algunos de los mapas de ruido generados con el apoyo del estudiantado del Trabajo Comunitario de la UCR (TC-727), accesible en: (https://drive.google.com/drive/folders/1G7sFwrqZbuDX3lap2QBq5DQJkZuyQLI4?usp=share_link). El modelo clásico de atenuación del sonido indica que la percepción del receptor varía, no solo por la distancia al punto de origen del ruido, sino por la existencia de barreras. En este sentido, las mediciones de campo evidenciaron que las estructuras urbanas robustas (edificaciones residenciales o comerciales) pueden ser una barrera importante para atenuar el impacto sonoro. Es ahí donde procesos de planificación urbana que busquen que las estructuras más cercanas a las estaciones tengan usos más tolerantes del ruido, es una muy buena estrategia de mitigación de los impactos, más cuando no se tienen recursos para la construcción de otro tipo de medidas ambientales como la colocación de pantallas acústicas. Así, la planificación efectiva del transporte tradicionalmente ha ayudado a mejorar la salud pública [4].

En el cuadro 2 se muestran los principales percentiles detectados por estación, considerando los valores medidos en el punto A que corresponde a la ubicación directa en el andén:

Cuadro 2. Niveles sonoros promedio identificados en las estaciones en estudio.

Percentil	Estación UCR	Estación U Latina	Estación CFIA	Estación Tres Ríos
L 90 (ambiente)	50 dB	55 dB	42 dB	50 dB
L 50 (media)	55 dB	70 dB	45 dB	70 dB
L 10 (máximos)	75 dB	80 dB	65 dB	80 dB

Se evidenció, de manera sistemática en todas las estaciones analizadas en campo, que en los momentos en que el tren va a salir de la estación o que requiere realizar el cruce de una vía transitada, el uso de la pitoreta es el momento más crítico registrado para el evento en estudio (alcanzando registros de hasta 110 dB). También se pudo evidenciar que el uso de dispositivos para detener el tránsito en las inmediaciones de las estaciones contribuye a disminuir el uso de las pitoretas, lo que a la vez ayuda a reducir el impacto sonoro.

Finalmente, se evidenció que otras fuentes de ruido pueden estar alterando la dinámica de contaminación sónica de un lugar. Según [5] cuando se realizan las mediciones de ruido es importante definir el ruido residual que se pueden generar por otras fuentes (principalmente el ruido de las carreteras). También es importante definir los momentos ideales para realizar estas mediciones dado que pueden ser afectadas por diferentes variables. Los mapas de ruido también reflejaron este comportamiento; por ejemplo, en la estación UCR, donde el ruido de circunvalación representa mayores niveles sonoros que el tren.

Análisis de percepciones de usuarios

El análisis de percepciones expuesto en este artículo permitió medir indirectamente los impactos sensoriales que el evento de llegada y salida del tren generan en las personas. Se debe considerar que la contaminación acústica genera consecuencias a largo plazo que las personas pueden no tener tan conscientemente mapeadas. El reto en este sentido fue definir un método de valoración de dichas percepciones que aportara información significativa, y que complementara las mediciones directas de campo.

De la población usuaria encuestada en las estaciones de estudio, se determinó que el 42% usan el tren para ir a estudiar, y 43% para ir al trabajo; ambas son actividades en general muy repetitivas, lo que concuerda con que el 45% lo usan todos los días. La gran mayoría de las personas usuarias camina para llegar al tren (52%), el segundo lugar lo ocupan las que llegan en autobús (31%), en general estas dos poblaciones califican predominantemente como mala la facilidad de conexión del tren con otros medios. Entre los resultados obtenidos de los sondeos realizados la población usuaria se logró evidenciar que el 56 % de las personas usuarias entrevistadas en 2019 indicaban que se percibía mucho ruido, contra solo el 25,5% en las encuestadas en 2022; si concuerda la mayor parte de la población total en que esto afecta la calidad del servicio que reciben y les genera molestias (94 %). Se mostró, al 95% de confianza, que no hay dependencia entre el género de la persona y la percepción de ruido. Al respecto, se menciona en la literatura que a nivel mundial se estima que un tercio de la población padece algún grado de sordera o pérdida auditiva dado a la exposición a sonidos de alta intensidad, lo que causa enfermedades físicas progresivas, es decir mientras más expuesta se encuentren las personas a estas condiciones de contaminación acústica de forma constante son peores las consecuencias de salud [16]. En este sentido quedaría para un segundo abordaje estudiar el impacto sonoro por el uso diario del tren o en sus trabajadores.

Percepciones de la población en el área de influencia directa

Al analizar la percepción de las poblaciones que están en el AID, se pudo evidenciar cómo perciben el tren de forma diferente, pero que en general todas perciben su impacto sonoro.

Entre la población que habita en el AID para el impacto sonoro se obtuvieron resultados congruentes, pues las estaciones que reportan más afectación por ruido son las que se encuentran en usos de suelo predominantemente residencial (CFIA y Tres Ríos). Los datos totales indican que el 37 % de la población siente un alto impacto sonoro y la mayoría de estas personas se ubican en las viviendas que están en los primeros 100 metros de radio de influencia; esa percepción del impacto disminuye levemente para las residencias encuestadas entre los 100 y 200 metros. Al evaluar la interrelación entre el nivel de afectación por ruido según la estación, se encuentra que las variables son dependientes, al 95% de confianza.

Adicionalmente, se sondeó entre los vecinos la importancia de otros impactos del tren, con lo que se encontró que el impacto sonoro es el más relevante, pues en general reportan poca o muy poca afectación por congestión vial o por la cantidad de personas ajenas, entre otros.

El comportamiento es algo diferente para el caso de las personas comerciantes que se evaluaron en la muestra. En esta población el 85% indicaron percibir poco o muy poco la afectación del impacto sonoro e indicaron percibir muy poca variación en comparación con la situación antes de la reactivación del tren. Esto concuerda con la teoría que indica que usos de suelo menos sensibles al ruido pueden adaptarse mejor a estar en las inmediaciones del tren. Adicionalmente, se les consultó si con el tren habían percibido alguna otra variación en el comportamiento de sus negocios, y en general reportaron muy baja variación en la variedad y cantidad de clientes o en la cantidad de ventas, tampoco sienten que la dinámica del tren haya atraído problemas como parqueo informal o seguridad en sus locales; por lo que el impacto más significativo lo representa el ruido generado. Al analizar el grado de independencia, se obtiene que no hay dependencia entre el nivel de afectación de ruido y la estación en estudio para el caso de los comercios, al 95 % de confianza; se necesitaría indagar más a fondo si esto se debe a que las personas comerciantes se suelen acostumbrar más al ruido del tren o están más expuestas a otras fuentes de sonido.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados evidenciaron la importancia de contemplar los patrones urbanos que se van a propiciar en las zonas de influencia del tren urbano, no solo por los beneficios que este sistema puede tener para la ciudadanía, sino para compatibilizar los usos del suelo con los potenciales impactos adversos. En particular se demostró que el impacto sonoro del tren, en el evento de llegada y salida de la estación, puede generar una afectación significativa, y estar por encima de la cantidad de decibeles permitidos en la regulación nacional vigente para zonas residenciales y no así en zonas comerciales. Es por ello que usos de suelo más tolerantes al ruido al menos en los primeros 100 metros desde una estación puede ser muy oportuno para balancear la necesidad del servicio, el ruido que genera y la alteración de las condiciones de vida de los habitantes cercanos.

Al mismo tiempo, se evidenció como eventos extremos se producen por el uso de los dispositivos tipo pitoretas, lo que agrava la contaminación sónica urbana. Por tanto, la implementación de medidas de mitigación indirectas, como la separación física entre el tren y los otros medios de transporte, evidenció una mejoría en el nivel sonoro crítico (L10).

Los mapas de ruido resultaron ser una herramienta muy valiosa para entender el comportamiento espacial de la variable en estudio (contaminación sónica), y permitieron evidenciar cómo los niveles de sonido a los que se está expuesto en un conglomerado de puntos (AID) pueden tener

diferentes fuentes detonantes del impacto, que se suman al impacto del sistema en evaluación, e incluso pueden llegar a enmascararlo. Por ejemplo, cuando las estaciones se encuentran muy cercanas a carreteras altamente transitadas, como el caso de la estación UCR, el mapa reflejó cómo es mayor el nivel sonoro en las cercanías de estas vías que lo que aporta la estación. Esto puede no ser adecuadamente interpretado por las personas afectadas, quienes identifican más claramente el ruido del tren y lo sienten más perturbador que el de la carretera, que es un ruido más continuo y al que se acostumbran.

Autores como [3] plantean como opciones para mitigar este impacto sonoro métodos pasivos que consisten en el uso de muros de protección acústica y ventanas aislantes, no obstante, esto requiere una mayor inversión monetaria. También existen las medidas dirigidas a la fuente generadora del ruido, que por lo general va orientada al cambio de tecnología vieja por tecnología moderna que generan un menor impacto ambiental. Este último punto si pudo verse reflejado en los datos de campo, pues cuando llegaba la locomotora más vieja, los niveles registrados por los sonómetros aumentaban en el orden de los 5 a 8 dB por encima de los parámetros medidos para los trenes más nuevos.

Finalmente, sería recomendable realizar estudios similares en otros ramales del tren urbano en Costa Rica, para reforzar las conclusiones a las que se ha podido llegar y para identificar potenciales zonas de conflicto en cuanto al impacto sonoro existente en sitios con usos del suelo sensibles al ruido (residenciales, educacionales, hospitalarios). Esto permitiría contar con mejores insumos para los procesos de planificación urbana orientada al transporte. Se concuerda con lo expresado por Quezada [17]: “La lucha contra el ruido está basada en una serie de estrategias tanto técnicas como administrativas... habría que insistir en que la existencia de una legislación adecuada es fundamental, así como un alto nivel de conciencia ciudadana”.

Referencias

- [1] L Abad, D Colorado, D Martín y M Retana. *Ruido ambiental: seguridad y salud*. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 8(9),696-8085. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3719298> [Consultado el 12 de mayo de 2019]
- [2] D Amo, Contaminación Acústica Causada por el Transporte en el País Vasco y Cataluña: una aproximación estadística-Proyecto TransP1, 2016. Disponible en: <https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/22223/629357.pdf>. [Consultado el 12 de mayo de 2019]
- [3] U Clausen, C Doll, F Franklin, G Franklin, H Heinrichmeyer, J Kochsiek, W Rothengatter y N Sieber, Reducción de la Contaminación Acústica en el Sector Ferroviario (PE 474.533), 2012. Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET\(2012\)474533\(SUM01\)_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET(2012)474533(SUM01)_ES.pdf). [Consultado el 25 de mayo 2019]
- [4] R Lee y I Sener, Transportation planning and quality of life: Where do they intersect?, 2016. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X16300968?via%3Dihub>. [Consultado el 01 de agosto de 2022]
- [5] M Nemec, A Danihelová, T Gergel, M Gejdos, V Ondrejka y Z Danihelová, Measurement and Prediction of Railway Noise Case Study from Slovakia, 2020. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7277611/>. [Consultado el 30 de junio de 2022]
- [6] M Wrótny y J Bohatkiewicz, Impact of Railway Noise on People Based on Strategic Acoustic Maps. sustainability, 12(14), 2020. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5637>. [Consultado el 30 de junio de 2022]
- [7] J Jiménez y C Linares, Efectos en salud del ruido de tráfico: Más allá de las “molestias”, 2015. Disponible en: <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/download/709/714>. [Consultado el 30 de junio de 2022]
- [8] Real Academia Española, Contaminación Acústica, 2020. Disponible en: <https://dpej.rae.es/lema/contaminaci%C3%B3n-ac%C3%BAstica>. [Consultado 16 de julio de 2020]

- [9] Y González y Y Fernández, Efectos de la contaminación sónica sobre la salud de estudiantes y docentes, en centros escolares, *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 52(3), 1561-3003, vol.52, no.3, set-dic 2014. [En línea]. Disponible: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032014000300012
- [10] L Madrigal, Hace 20 años, José María Figueres cerró el INCOFER y el país sufre hoy las consecuencias, 2015. Disponible en: <https://www.elmundo.cr/costa-rica/hace-20-anos-jose-maria-figueres-cerro-el-incofer-y-el-pais-sufre-hoy-las-consecuencias/>. [Consultado el 14 de setiembre de 2022]
- [11] R Ayala, Plan de ruido: Plan ordenación urbana contra el ruido. Stop Ruido, 2017. Disponible en: <http://www.abogadosruidos.com/blog/plan-ordenacion-urbana-prevenir-ruidos.php>. [Consultado el 18 de setiembre de 2022]
- [12] M Frost y S Ison, S, Comparison of noise impacts from urban transport, 2007. Disponible en: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/epdf/10.1680/tran.2007.160.4.165>. [Consultado el 30 de junio 2022]
- [13] J Romero, A Jiménez, A Marín, A Sanchis y S Cerdá, Un primer estudio del ruido en los actuales trenes de la red ferroviaria española, 2016. Disponible en: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/revista_VOL34-12_01_01.pdf. [Consultado el 20 de mayo 2021]
- [14] A Segundo, W Contreras, J Delgado, M Owen, M Rondón, A Contreras, Estudio de Distribución Espacial de la contaminación acústica en la ciudad de Mérida, Venezuela, 2017. Disponible en: <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/bitstream/handle/654321/534/21921923834.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Consultado el 20 de febrero 2020]
- [15] Instituto Costarricense de Ferrocarriles, Informe de estadísticas operativas II semestre 2019. Disponible en: <http://www.incofer.go.cr/estadisticas/index.htm>. [Consultado el 25 de agosto 2022]
- [16] L Morales, D Aldás, S Collantes y J Reyes, “Implicaciones en la salud ocupacional por exposiciones de luz y ruido en trabajadores de manufactura de calzado”, vol.14, no.1, ene-jul 2015. [En línea]. Disponible: <https://revistasdigitales.upec.edu.ec/index.php/sathiri/article/view/817>
- [17] R Quezada, “El Ruido en la Planificación Territorial Comuna de Providencia”, 2002. Disponible en: <http://cyber-tesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmfciq.5r/doc/bmfciq.5r.pdf>. [Consultado el 25 de mayo 2022]

Efectos de la longitud de onda de luz, el fotoperiodo y la salinidad en los parámetros de producción de *Isochrysis galbana*

Effects of the wavelength of light, photoperiod, and salinity in the production parameters of *Isochrysis galbana*

Silvia Ramírez-Flores¹, Francinie Murillo-Vega²,
Fabian Villalta-Romero³, Maritza Guerrero-Barrantes⁴

Fecha de recepción: 14 de abril, 2023
Fecha de aprobación: 22 de julio, 2023

Ramírez-Flores, S; Murillo-Vega, F; Villalta-Romero, F; Guerrero-Barrantes, M. Efectos de la longitud de onda de luz, el fotoperiodo y la salinidad en los parámetros de producción de *Isochrysis galbana*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 88-101.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6693>

- 1 Universidad Técnica Nacional, Sede Regional Puntarenas. Costa Rica. Correo electrónico: sramirezf@utn.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4809-8022>
- 2 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: frmurillo@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-2751-8390>
- 3 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fvillalta@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7484-8125>
- 4 Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mguerrero@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-8253-5919>

Palabras clave

Microalgas; luz azul; luz LED; fotosíntesis; acuicultura.

Resumen

La microalga *Isochrysis galbana* es un bioproducto alimenticio fundamental en los cultivos acuícolas, ya que aporta calidad nutricional a las larvas en su desarrollo óptimo. El desarrollo de la acuicultura en Costa Rica ha generado la necesidad de fomentar la producción microalgal para producir mayor cantidad y calidad de biomasa, por lo que se generó un diseño para evaluar la incidencia de factores ambientales en el cultivo de esta microalga. Los cultivos microalgas se llevaron a cabo en botellas con una capacidad de 5,5 L, se realizaron en total 6 tratamientos, tres con longitud de onda de luz blanca (500 nm) y tres con longitud de onda de luz azul (455 nm). En cada longitud de onda se analizaron tres fotoperiodos: a- 16h:8h, b- 12h:12h y 24h (Luz/Oscuridad) y 4 salinidades (32ppm, 30ppm, 28ppm y 25ppm) las cuales se trabajaron por triplicado, para un total de 12 cultivos por tratamiento. Después de 12 días de cultivo se observó una mayor cantidad de células/ml en el tratamiento de luz azul con irradiación constante 24h y salinidad de 28ppm, El fotoperiodo de 12h:12h (L/O) no tuvo un buen crecimiento en ninguna de las longitudes de onda de luz empleadas. En cuanto a la producción de biomasa se determinó que la luz azul, con fotoperiodo 16h:8h (L/O) y salinidad de 30ppm fue el que produjo mayor biomasa seca. Se pudo determinar que la combinación de factores de luz azul, con luz constante de 24h y salinidad de 28ppm, permitieron alcanzar la mayor densidad celular.

Keywords

Microalgae; blue light; LED light; photosynthesis; aquaculture.

Abstract

Production of *Isochrysis galbana* is one of the fundamental steps in oyster farms. The nutritional quality of this microalgae is very important, from this will depend the optimal development of the larvae, since in Costa Rica oyster culturing is growing, optimizing the microalgal culture has become a necessity not only in terms of producing more biomass but also to reduce the cost associated to it. For the bioassays, bottles with a capacity of 5.5 L were used, a total of 6 tests were carried out, three with a wavelength of white light (500 nm) and three with a wavelength of blue light (455 nm), at each wavelength three photoperiods were tested 16h:8h, 12h:12h and 24h (Light/Dark) and 4 salinities (32ppm, 30ppm, 28ppm and 25ppm). After 12 days of culture, it was observed that the highest number of cells/ml were obtained in the blue light treatment, with constant irradiation 24h and salinity of 28ppm. The photoperiod of 12h:12h (L/O) did not have a good effect on growth in any of the wavelengths of light used. Regarding biomass production, it was determined that the blue light treatment, photoperiod 16h:8h (L/O) and salinity of 30ppm was the one with the highest weight of dry biomass. The bioassays made it possible to determine that the combination of blue light, with constant irradiation 24h and salinity of 28ppm, showed the highest cell density.

Introducción

En acuicultura las microalgas son fuentes de alimento necesarias en diferentes fases de crecimiento por ser capaces de producir los nutrientes básicos y de calidad para el desarrollo de especies acuícolas en producción [1]. Estas se consideran una fuente primaria de proteínas, carbohidratos, lípidos y vitaminas, necesarios para el desarrollo larval de muchas especies de

importancia económica de especies marinas. En específico, los lípidos son un nutriente muy importante durante el desarrollo temprano de las larvas al prevenir malformaciones, además de intervenir en la regulación de procesos fisiológicos como el crecimiento, osmorregulación y la reproducción [2].

Los ácidos grasos poliinsaturados, se utilizan en la industria alimentaria tanto animal como humana, entre los más utilizados están el ácido decosaexanoico (DHA) y ácido eicosapentaenoico (EPA), más conocidos como omega 3, los cuales son necesarios para un correcto funcionamiento metabólico, así como para prevenir enfermedades inflamatorias y neurodegenerativas [3][2], actualmente el DHA y el EPA se extraen del aceite de pescado, lo que ha provocado una sobreexplotación del recurso marino, sin embargo, por su importancia se hace necesario contar con diferentes fuentes para cumplir con los requerimientos nutricionales, tanto de las especies cultivadas como del ser humano, en respuesta a esto se han considerado fuentes alternativas como la producción de las microalgas marinas, que al ser productoras primarias de omega 3, permitirían avanzar en el desarrollo de dietas balanceadas para el cultivo de peces de origen marino [4].

Es necesario establecer las características fisicoquímicas del cultivo de microalgas en reactores, ya que se requiere obtener una mayor producción de biomasa en menor tiempo, con alto contenido de DHA y EPA a menor costo [5]. Esto implica conocer con detalle la respuesta de la microalga en cuanto a duplicación y producción de biomasa, cuando se expone a diferentes condiciones como fotoperíodo, concentración salina y diferentes longitudes de onda de la luz (WL, siglas en inglés) [5] [6]. La inducción de las microalgas a condiciones de estrés permite que esta utilice diferentes rutas metabólicas y como resultado de esto, la acumulación de metabolitos primarios como lípidos en el citoplasma [7] [8].

Estudios realizados en biorreactores, que utilizan lámparas fluorescentes con una longitud de onda de luz (WL, por sus siglas en inglés) que va desde los 400 y hasta los 500 nm, han revelado que las microalgas presentan baja actividad fotosintética y que el uso de estas luces implica un alto consumo energético por el uso ineficiente de la luz [9] [10] [11]. Para mejorar la eficiencia fotosintética de las microalgas se utilizan LEDs (diodos emisores de luz), que permiten utilizar WL específicas y monocromáticas [12]. Zhong *et al.* [13], emplearon luces LED con WL roja y azul en cultivos de especies de *Phaeodactylum tricornutum*, *Isochrysis galbana*, *Nannochloropsis salina* y *Nannochloropsis oceánica* y determinaron que estas longitudes de onda estimulan pigmentos fotosintéticos, que da como resultado un aumento de células/ml y una mejor composición bioquímica en contraposición a las microalgas cultivadas con luz blanca. Yoshioka *et al.* [14], Sánchez-Saavedra *et al.* [11], aplicaron luz azul a un cultivo con la especie *I. galbana* y determinaron que esta WL fomenta la duplicación celular en menor cantidad de tiempo.

Con respecto al mejoramiento de la eficiencia de la cinética de crecimiento de la microalga en respuesta a los cambios del fotoperíodo, Sirisuk *et al.* [12] determinaron que el crecimiento celular bajo diferentes WL varía de acuerdo con el fotoperíodo utilizado. La luz continua (24h) aplicada a los cultivos tiene un efecto directo positivo en su capacidad para aumentar la biomasa [15], sin embargo, Sirisuk *et al.* [12] y Zhong *et al.* [13], probaron otros fotoperíodos similares a las condiciones de luz natural y determinaron que bajo un régimen de irradiación de 16h:8h (L/O), la densidad celular aumenta, esto permite mejorar la eficiencia de producción al cultivar las microalgas con iguales o mejores resultados de crecimiento y a un menor costo energético. Yoshioka *et al.* [14], cultivaron *Isochrysis galbana*, hicieron modificaciones en la WL y el fotoperíodo y observaron que estos cambios tienen un efecto positivo en la cinética de crecimiento, pues bajo condiciones de luz azul intermitente, hubo aumento de la densidad celular, comparada con el tratamiento control de luz blanca continua, reportaron una densidad celular de $3.5 \pm 0.6 \times 10^5$ células mL⁻¹ y $1.9 \pm 0.3 \times 10^5$ cel/ mL⁻¹ respectivamente.

Las concentraciones de salinidad en el medio de cultivo también interactúan con la WL, el uso de salinidades similares a las del medio natural donde habita la microalga, permite reducir el estrés de las células y obtener una mejor densidad celular, esto se debe a que la salinidad tiene un importante papel en la osmorregulación celular [1]. Suyono *et al.* [16] demostraron que en cultivos de *Chlorella vulgaris* expuestos a luz azul y salinidades de 12ppm, 19ppm y 21ppm, se alcanza mayor biomasa en los cultivos con salinidad de 19 ppm. Por otro lado, Ra *et al.* [17], con *I. galbana* determinó que la biomasa se incrementa, al cultivarla con una salinidad de 32 ppm y longitud de onda de luz azul, contrario a cuando se cultiva con luces rojas y blancas y la misma salinidad.

Este estudio pretende determinar el efecto de la longitud de onda de luz, el fotoperiodo y la salinidad, en la cinética de crecimiento de *Isochrysis galbana*. con el fin de generar las condiciones óptimas de menor costo y de mayor rendimiento en la producción de biomasa.

Metodología

El montaje de los sistemas de cultivo y los bioensayos, se realizaron en el Laboratorio de Producción de Plancton Marino (LPPM) de la Estación de Biología Marina de la Universidad Nacional, una vez establecidos los cultivos, las muestras diarias tomadas de los botellones se llevaron al Laboratorio de Patología Acuícola (LAPA) de la Universidad Técnica Nacional para determinar la densidad óptica y realizar los conteos celulares, ambos laboratorios están ubicados en la ciudad de Puntarenas, Costa Rica. Al finalizar, los cultivos se trasladaron al Laboratorio de Microalgas del Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde se concentró la biomasa y se realizaron los análisis a la biomasa microalgal.

Se empleó la microalga *Isochrysis galbana*, por su alto contenido de proteínas, así como de lípidos, especialmente del ácido graso docosahexanoico (DHA), la cepa fue suministrada por el Laboratorio de Producción de Plancton Marino de la Universidad Nacional. Se cultivó en un sistema tipo "batch" en botellones con 6 L de capacidad, a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, con flujo de aire constante y medio de cultivo "F/2" de Guillar (J. Stein, 1979). El equipo de iluminación consistió en barras de luces LED blancas de 18W y 6000 K e intensidad lumínica de $76.44\text{ }\mu\text{moles}/\text{m}^2/\text{s}$ y barras de luz LED azul de 18W y 6000 K, con una intensidad lumínica de $32.48\text{ }\mu\text{moles}/\text{m}^2/\text{s}$, colocadas en posición vertical para cubrir en toda la longitud a dos botellones,

Para analizar el efecto en la cinética de crecimiento de *I. galbana* con diferente longitud de onda de la luz, fotoperiodo y concentración de la salinidad se evaluó en este estudio: dos longitudes de onda de la luz azul (455nm) y blanca (500 nm), tres fotoperiodos 16h:8h, 12h:12h (L/O), 24 h (luz) y cuatro salinidades (32ppm, 30ppm, 28ppm y 25ppm), con tres repeticiones cada uno, con una duración de cultivo de 12 días y con un volumen de trabajo de 5.5 L. Los controles para cada tratamiento fueron cultivados con luz blanca o azul, salinidad de 32 ppm y 24 horas de luz continua.

Durante los 12 días de cultivo, se tomaron 5 ml de cada unidad experimental a la misma hora y se fijaron con lugol para realizar el conteo celular (cel/ml), cada muestra se contó en la cámara Neubauer, haciendo una dilución 1:10. La evaluación de la densidad óptica se realizó en un biofotómetro (Eppendorf, modelo D30), con una longitud de onda de 550 nm [18]. Para la determinación del peso seco de la biomasa se tomaron 10 ml de cada tratamiento en el día 12, se utilizó un filtro de acetato de celulosa de $0.2\text{ }\mu\text{m}$ previamente seco, posteriormente la muestra se filtró con un Kitasato, se llevó a un horno a 60°C hasta llevar a peso constante. La biomasa filtrada se colocó en un analizador de humedad (RADWAG PMR 50) para calcular la humedad relativa de la misma.

Para calcular los parámetros productivos microalgales en los cultivos de *I. galbana*, se emplearon las fórmulas descritas en el cuadro 1.

Cuadro 1. Fórmulas para cálculo de parámetros productivos microalgales.

Incógnita	Fórmula*
Concentración celular en cámara de NeauBauer	$C = N \times 10^4 \times dil$
Velocidad de crecimiento en fase exponencial(μ_e)	$\frac{\ln 2}{td}$
Productividad de biomasa (cel/ml d ⁻¹ x10 ⁻⁶)	$\frac{Xf - X^o}{tf - t^o}$

*C= células/mL; N=promedio de células presentes en 1 mm²; 10⁴= factor de conversión de 0.1 μ L a 1 mL; dil= dilución (1:10)

Para cada color de luz y fotoperiodo se hizo una comparación entre salinidades, para determinar si tenían un efecto significativo sobre la velocidad de crecimiento y la productividad de la biomasa, para esto se aplicó la prueba de normalidad Shapiro wilk, un análisis de varianza de una vía ANOVA y una prueba post-hoc de Tukey ($p \leq 0.05$), con el programa estadístico InfoStat estudiantil versión 2014.

En el análisis estadístico, se utilizaron modelos lineales generalizados mixtos, para determinar el efecto de los tratamientos (longitud de onda, salinidad y fotoperíodo) sobre la producción de biomasa (g/ml) y densidad celular. Para analizar el efecto de las variables a evaluar sobre la producción de biomasa y la densidad celular se incluyó en el modelo: el tratamiento y las repeticiones como variables predictivas. Inicialmente, el modelo incluía todas las variables predictivas mencionadas anteriormente y las interacciones entre ellas (modelo saturado). Para el modelo final, se excluyeron aquellas variables que no tuvieron impacto en la predicción del efecto que tienen la longitud de onda, el fotoperíodo y la salinidad, sobre la producción de biomasa y la densidad celular, utilizando los criterios de Akaike (AIC) y el análisis de los residuos. Los análisis estadísticos y los gráficos se realizaron utilizando el lenguaje estadístico R (versión 3.02: R Core Team 2013).

Resultados

Los resultados obtenidos a partir de este estudio demostraron que, la longitud de onda de la luz, el fotoperiodo y la salinidad afectan la producción de biomasa en los cultivos de microalgas.

Al estimar los parámetros de cinética celular y analizar los cambios en la productividad celular diaria (cel/ml día⁻¹), se observó que en los cultivos microalgales sometidos al tratamiento de luz azul, y con salinidad de 28 ppm e irradiación continua (24h), hubo un aumento significativo en la productividad $1,43 \pm 0,05$ cel/ml d⁻¹ (p -valor ≤ 0.05) respecto a aquellos cultivos que se sometieron a la condición de luz blanca (figura 1). Los cultivos con un fotoperiodo de 12h:12h (L/O), tanto en luz blanca como en luz azul, mostraron una productividad de la microalga significativamente menor, específicamente el fotoperiodo 12h:12h (L/O) y salinidad de 32ppm obtuvo la menor productividad con $0,63 \pm 0,12$ cel/ml d⁻¹ (p -valor ≤ 0.05) (figura 1). Para el color de luz blanca, se observó que el tratamiento con fotoperiodo 16h:8h (L/O) y salinidad de 25ppm, fue el que tuvo un aumento significativo en la productividad celular diaria con un valor de $1,27 \pm 0,03$ cel/ml d⁻¹ (p -valor ≤ 0.05) (figura 1).

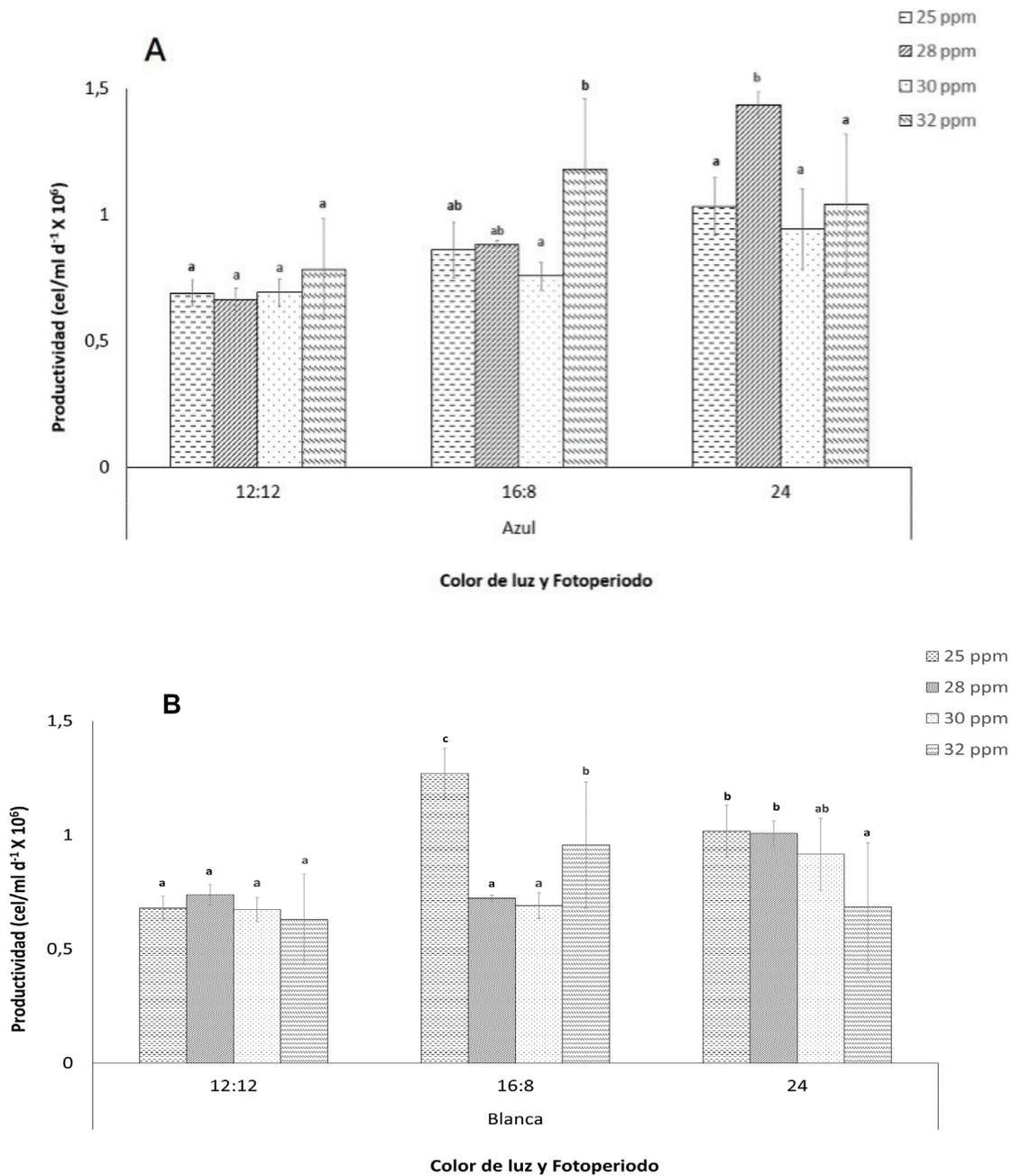


Figura 1. Efecto del fotoperiodo, salinidad y color de luz en la productividad (cel/ml d⁻¹ × 10⁻⁶) de *I. galbana*. A. Tratamiento de luz azul, B. Tratamiento luz blanca. Las barras de error representan la desviación estándar (n=3). Valores que no comparten una letra son significativamente diferentes (p-valor ≤ 0.05) dentro de los tratamientos.

Los análisis de la velocidad de crecimiento $\mu(d^{-1})$ de los cultivos celulares de *I. galbana*, se observa que, con luz azul, con fotoperiodo 24 h y una salinidad de 28 ppm, se propicia el mayor crecimiento de la microalga $0,38 \pm 0,006 \mu(d^{-1})$ (p-valor ≤ 0.05), no así para los cultivos donde se utilizó luz blanca, que se obtuvieron los mejores resultados de velocidad de crecimiento con una salinidad de 25 ppm y el fotoperiodo de 16h:8h (L/O) $0,36 \pm 0,003 \mu(d^{-1})$ (p-valor ≤ 0.05) (figura 2). De igual manera se observó que el fotoperiodo 12h:12h (L/O) tuvo una velocidad de

crecimiento significativamente menor en ambos colores de luz utilizados, con resultados más bajos en las condiciones de luz blanca y salinidad de 32 ppm $0,19 \pm 0,02 \mu\text{e}(\text{d}^{-1})$ ($p\text{-valor} \leq 0,05$) (figura 2).

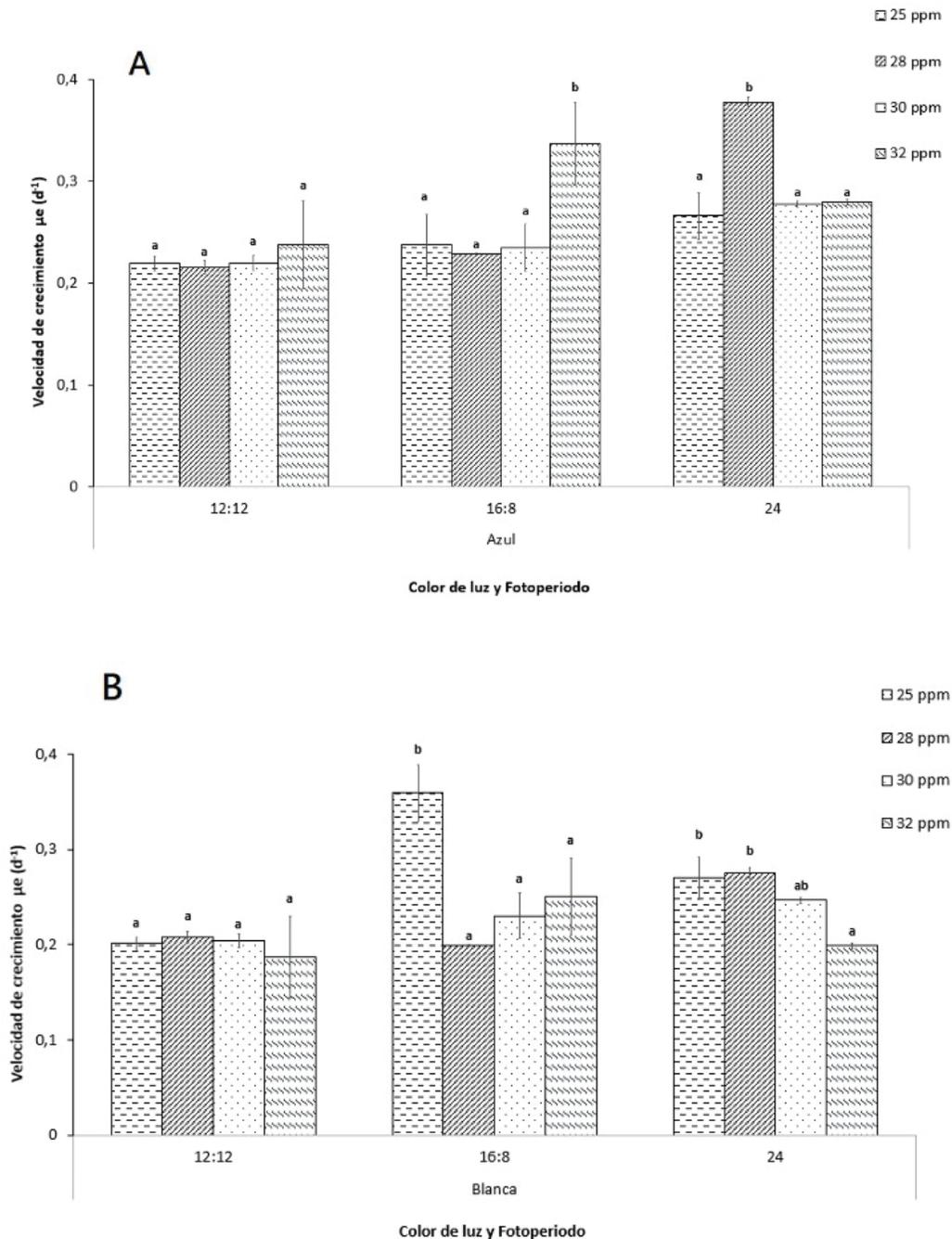


Figura 2. Efecto del fotoperiodo, salinidad y color de luz en la velocidad de crecimiento en fase exponencial $\mu\text{e}(\text{d}^{-1})$ de *I. galbana*. A. Tratamiento de luz azul, B. Tratamiento luz blanca. Las barras de error representan la desviación estándar ($n=3$). Valores que no comparten una letra son significativamente diferentes ($p\text{-valor} \leq 0,05$) dentro de los tratamientos.

El análisis estadístico del modelo lineal mixto aplicado a los datos de densidad celular (cel/ml), permitió determinar el efecto que tuvieron los tres fotoperiodos con luz blanca y la salinidad en el medio de cultivo. Se demostró, que los cultivos con salinidades de 28ppm y 25ppm presentaron mayor cantidad de células por mililitro ($P=0.0023$ y $P=0.0110$ respectivamente), por otro lado, se observa que los cultivos llegaron a alcanzar mayor densidad celular con fotoperiodos de 24h y de 16h:8h (L/O) (cuadro 2).

Cuadro 2. Modelo lineal mixto para luz blanca, en salinidades 32 ppm, 30 ppm, 30 ppm, 30ppm, 28ppm y 25ppm, con fotoperiodos 24 h luz, 12h:12h y 16h:08h (L/O).

Tratamiento	Estimado	Error Estándar	df	T	P(valor)
(Intercept)					
32ppm 12h	4.230e+06	6.825e+05	1.268e+01	6.197	3.61e-05 ***
30ppm	1.015e+05	1.181e+05	3.868e+21	0.860	0.3900
28ppm	3.600e+05	1.181e+05	3.879e+21	3.048	0.0023 **
25ppm	3.002e+05	1.181e+05	2.681e+21	2.541	0.0110 *
16h	1.382e+06	1.023e+05	6.682e+22	13.510	< 2e-16 ***
24h	1.378e+06	1.023e+05	1.913e+22	13.471	< 2e-16 ***

En el análisis de la interacción de la densidad celular en cultivos microalgales expuestos a luz azul, donde se considera el fotoperiodo vs concentración de salinidad vs día, muestran que las densidades son similares en casi todos los tratamientos estudiados. Se observó que, indistintamente a la concentración de sal que se utilice en los cultivos, la densidad celular no cambió. Además, se determinó que existe una disminución en la densidad celular, en aquellos cultivos expuestos a fotoperiodo de 12h:12h L/O ($P= 0.00418$) (cuadro 3).

Cuadro 3. Modelo lineal mixto para determinar el efecto de luz azul, en salinidades 32 ppm, 30ppm, 28ppm y 25ppm, con fotoperiodos 24 h luz, 12h:12h y 16h:08h (L/O).

Tratamiento	Estimado	Error Estándar	df	T	P(valor)
(Intercept)					
32ppm 24h	2.512e+06	2.409e+05	4.471e+42	10.431	< 2e-16 ***
30ppm	-2.356e+05	1.830e+05	4.471e+42	-1.287	0.19797
28ppm	2.874e+04	1.830e+05	4.471e+42	0.157	0.87520
25ppm	1.508e+04	1.843e+05	4.471e+42	0.082	0.93477
16h	-4.652e+05	3.001e+05	4.471e+42	-1.550	0.12117
12h	-8.596e+05	3.001e+05	4.471e+42	-2.864	0.00418 **
día	6.819e+05	3.051e+04	4.471e+42	22.346	< 2e-16 ***
16h:día	-6.251e+04	4.276e+04	4.471e+42	-1.462	0.14373
12h:día	-1.980e+05	4.276e+04	4.471e+42	-4.631	3.64e-06 ***

El modelo lineal mixto de la densidad celular, que compara los cultivos sometidos a luz azul vs luz blanca con diferentes fotoperiodos (24 h luz, 16h:08h (L/O)) y salinidades muestran que, con luz azul continua de (24h) ($P < 0.001$) y una salinidad de 28 ppm ($P < 0.000251$) hay una mayor densidad celular, que en aquellos cultivos sometidos a luz blanca ($P < 0.001$) (cuadro 4).

Cuadro 4. Modelo lineal mixto para determinar el efecto de luz azul vs luz blanca, en salinidades 32 ppm, 30ppm, 28ppm y 25ppm, con fotoperiodos 24 h luz y 16h:08h (L/O).

Tratamiento	Estimado	Error Estándar	df	T	P(valor)
(Intercept)					
32ppm 24h	6.210e+06	7.372e+05	1.228e+01	8.424	1.88e-06 ***
30ppm	-1.074e+05	1.002e+05	1.167e+22	-1.072	0.283693
28ppm	3.668e+05	1.002e+05	1.562e+22	3.661	0.000251 ***
25ppm	1.889e+05	1.007e+05	7.867e+13	1.876.	0.060708
16h	-4.030e+05	7.102e+04	3.115e+14	-5.675	1.39e-08 ***
Luz blanca	-3.224e+05	7.102e+04	3.115e+14	-4.539	5.65e-06 ***

Productividad de biomasa microalgal (g/L) en cultivos de *I. galbana*

El modelo lineal con interacción, realizado para el análisis de la producción de biomasa, según cada tratamiento, mostró que se produjo mayor biomasa (g/L) bajo condiciones de luz blanca, con un fotoperiodo de 16h:8h (L/O), ($P = 0.00176$) y salinidad de 30ppm, no así con los demás tratamientos analizados (cuadro 5, figura 3).

Cuadro 5. Efecto de la luz blanca, la salinidad y fotoperiodo, sobre el aumento del peso seco de la microalga *Isochrysis galbana*.

Tratamiento	Estimado	Error estándar	df	T	P(valor)
(Intercepto)					
32ppm 24h	0.376667	0.128845	24.000000	2.923	0.00744 **
30ppm	-0.236667	0.182214	24.000000	-1.299	0.20634
28ppm	-0.236667	0.182214	24.000000	-1.299	0.20634
25ppm	-0.133333	0.182214	24.000000	-0.732	0.47141
16h	-0.033333	0.182214	24.000000	-0.183	0.85639
12h	0.003333	0.182214	24.000000	0.018	0.98556
30ppm:16h	0.906667	0.257689	24.000000	3.518	0.00176 **
28ppm:16h	0.123333	0.257689	24.000000	0.479	0.63655
25ppm:16h	0.016667	0.257689	24.000000	0.065	0.94897
30ppm:24h	0.213333	0.257689	24.000000	0.828	0.41590
28ppm:24h	0.286667	0.257689	24.000000	1.112	0.27696
25ppm:24h	-0.010000	0.257689	24.000000	-0.039	0.96937

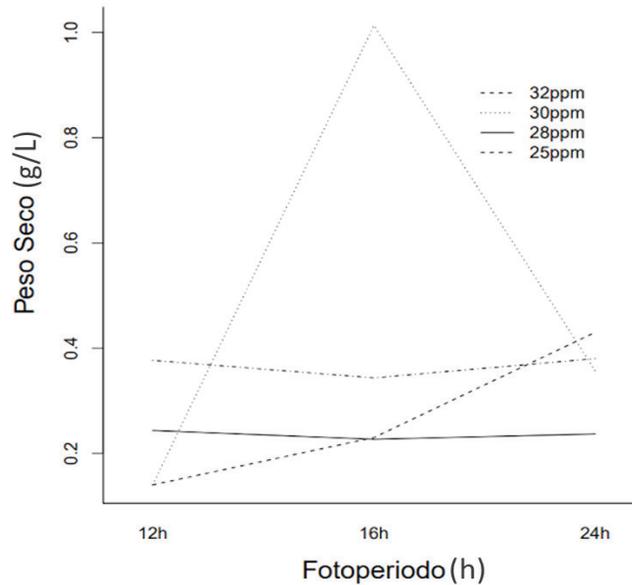


Figura 3. Interacción estadística del modelo lineal del efecto del color de la luz blanca, la salinidad y fotoperiodo, sobre el aumento del peso seco de la microalga *Isochrysis galbana*.

Los resultados de interacción del modelo lineal mixto aplicados a la producción de biomasa en cultivos expuestos a luz azul, diferentes fotoperiodos y al efecto de la salinidad, se determina que, en todos los casos, la producción es similar en todos los tratamientos. Por otro lado, cuando se analiza la variable fotoperiodo y la de salinidad, determina que se produce mayor cantidad de biomasa, con un fotoperiodo de 16h:8h (L/O) y una salinidad de 32ppm ($P < 0.0001$). Además, en esta prueba la interacción de variables analizadas demuestra que, el fotoperiodo vs salinidad produce menor biomasa en los cultivos con un fotoperiodo de 16h:8h (L/O) y 25 ppm de salinidad ($P < 0.0001$) (cuadro 6, figura 4).

Cuadro 6. Análisis de interacción del efecto del color de la luz azul, la salinidad y fotoperiodo, sobre la productividad de biomasa de la microalga *Isochrysis galbana*.

Tratamiento	Estimado	Error estándar	df	T	P(valor)
(Intercepto)					
32ppm	3.667e-01	6.439e-02	2.242e+01	5.695	9.31e-06 ***
12h					
30ppm	-4.667e-02	8.882e-02	2.093e+01	-0.525	0.6048
28ppm	4.333e-02	8.882e-02	2.093e+01	0.488	0.6307
25ppm	-1.200e-01	8.882e-02	2.093e+01	-1.351	0.1911
16h	5.467e-01	8.882e-02	2.093e+01	6.155	4.23e-06 ***
24h	-2.333e-01	8.882e-02	2.093e+01	-2.627	0.0158 *
30ppm:16h	-2.233e-01	1.256e-01	2.093e+01	-1.778	0.0899.
28ppm:16h	-1.667e-01	1.256e-01	2.093e+01	-1.327	0.1989
25ppm:16h	-6.700e-01	1.256e-01	2.093e+ 01	-5.334	2.76e-05 ***
30ppm:24h	2.000e-02	1.256e-01	2.093e+01	0.159	0.8750
28ppm:24h	2.390e-15	1.256e-01	2.093e+01	0.000	1.0000
25ppm:24h	1.144e-01	1.335e-01	2.120e+01	0.857	0.4012

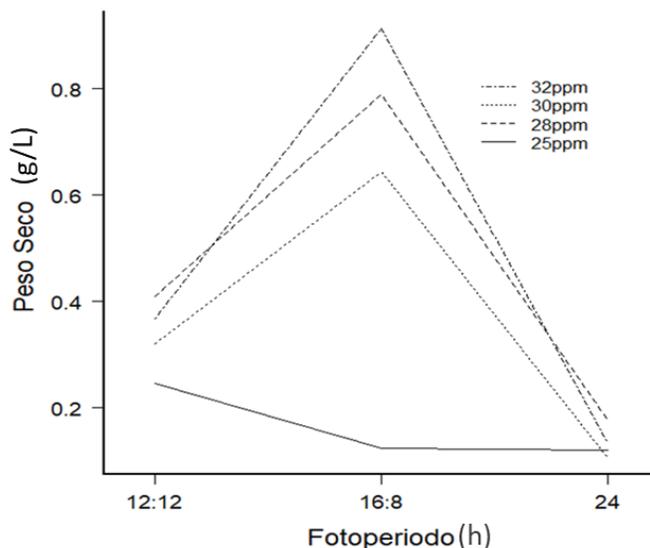


Figura 4. Análisis de interacción del efecto del color de la luz azul, la salinidad y fotoperiodo, sobre la productividad de biomasa de la microalga *Isochrysis galbana*.

En general cuando se comparan ambos colores de luz empleados en los cultivos, se determina que la luz azul y el fotoperiodo 16h:8h (L/O) y salinidades de 28ppm, 30 ppm y 32 ppm induce a una mayor producción de biomasa (cuadro 7).

Cuadro 7. Análisis de modelo lineal entre el efecto de la productividad biomásica, cuando se expone a luz blanca y luz azul. Se analiza la concentración de la salinidad y fotoperiodo, sobre la productividad de biomasa de la microalga *Isochrysis galbana*.

Tratamiento	Estimado	Error Estándar	df	T	P(valor)
(Intercept)					
32ppm	0.35625	0.07769	64.00000	4.585	2.16e-05 ***
12h					
30ppm	0.01111	0.08306	64.00000	0.134	0.89400
28ppm	-0.05611	0.08306	64.00000	-0.676	0.50174
25ppm	-0.22074	0.08432	64.00000	-2.618	0.01103 *
Luz Blanca	-0.01879	0.05918	64.00000	-0.318	0.75183
16h	0.25500	0.07193	64.00000	3.545	0.00074***
24h	-0.03889	0.07275	64.00000	-0.535	0.59481

Discusión

En los bioensayos realizados, se pudo determinar que, tanto en luz blanca como en luz azul, los fotoperiodos tienen un papel importante en el aumento de parámetros de producción de la microalga, resultando que el fotoperiodo con menor tiempo irradiación, no favorece los parámetros productivos, en ninguno de los colores de luz y concentraciones de salinidad probados; se observó en el resultado de la interacción lineal para luz blanca, que en los fotoperiodos de 24h y 16h:8h (L/O) con 28ppm y 25 ppm de salinidad hubo mayor densidad celular, resultado congruente con el obtenido en el análisis de varianza para comparar las salinidades, en cada color de luz y fotoperiodo, el cual permitió observar que, la producción de biomasa y la velocidad de crecimiento aumentan los fotoperiodos 24h y 16h:8h (L/O) y

salinidades 28ppm y 25 ppm. Estos resultados pueden ser comparados a los obtenidos por Yusof *et al.* [15], quienes al cultivar *I.galbana* en condiciones de luz blanca y con fotoperiodos 12h:12h (L/O) y 24 h luz continua, observaron un aumento de la densidad celular al utilizar iluminación continua, atribuido a que mientras más largos sean los períodos de exposición a la luz, la microalga puede mantenerse en una fase continua de crecimiento, debido a que se garantiza que la energía total y el carbón fijado que se producen durante la fotosíntesis aumenten [19] [15].

El resultado del análisis de la interacción de los factores: luz azul vs luz blanca vs fotoperíodo vs salinidad sobre el efecto en la densidad celular (cel/m), demostró que los cultivos sometidos a luz azul con 24 h de exposición de fotoperíodo y con 28 ppm de salinidad presentan mayor cantidad de células/ mL, por otro lado a partir del análisis de varianza para comparar las salinidades, en cada color de luz y fotoperíodo permitió determinar que la producción de biomasa y la velocidad de crecimiento celular también son mayores en las condiciones de luz azul supracitadas. Esto es congruente con lo obtenido por Yoshioka *et al.* [14]; Sánchez-Saavedra *et al.* [11]; Sirisuk *et al.* [12], quienes emplearon diferentes longitudes de onda de luz (blanca, roja y azul), y pudieron observar que la densidad celular fue mejor bajo condiciones de luz azul, que con los demás colores probados. Como mencionan los autores supracitados, dicho comportamiento se puede deber a que *Isochrysis galbana* tiene una mejor capacidad de adaptarse a condiciones bajas de luminosidad, por el contenido clorofila c y clorofila a que posee en los cloroplastos, estos pigmentos absorben con mucha efectividad las bandas rojas y azules del espectro de luz, y le proporciona a la microalga la posibilidad de extender los espectros de absorción de la luz, permitiendo que la fotosíntesis se desarrolle, al garantizar un flujo continuo de electrones en los fotosistemas.

En cuanto al efecto de la concentración de salinidad utilizadas en los medios de cultivo de *I. galbana* sobre la densidad celular (cel/ml), se observó que con 28ppm y 25 ppm aumento del número de células. Estudios realizados por Ono *et al.* [20], encontraron que el crecimiento de *I.galbana* en condiciones de salinidad de 27 ppm era mejor que en salinidades de 15 ppm o de 35 ppm, determinó que el efecto que tienen los valores altos de salinidad sobre el crecimiento de la especie son negativos y se manifiestan en la reducción de la tasa fotosintética de la microalga, la respiración y por ende en el crecimiento, por otro lado, si se trabaja con una salinidad baja en el medio de cultivo, se genera una condición hipotónica que hace que la célula se hinche y explote. En rangos de salinidad intermedios como los usados en este experimento, se pudo observar lo mencionado por Velasco *et al.* [1] y Cañaverate *et al.* [21] quienes determinaron que *I. galbana* tiene la capacidad de adaptarse a cambios de salinidad, esto lo hace al aumentar su volumen celular por medio de un mecanismo de regulación osmótica, en el cual capta iones hacia el interior de la célula y esto permite que se hinche sin reventarse y sin comprometer el buen funcionamiento de su mecanismo celular garantizando su crecimiento.

A partir de la interacción lineal realizada para la producción biomásica microalgal (g/mL) se observó que hay un aumento de la producción en cultivos con luz blanca, con fotoperíodo 16h:8h (L/O) y salinidad de 30ppm, así mismo, las pruebas estadísticas de interacción entre luz blanca vs luz azul vs fotoperíodo vs salinidad señalan que la producción biomásica en luz azul es similar excepto por una marcada reducción en la biomasa, bajo condiciones de fotoperíodo 16h:8h (L/O) y salinidad de 25 ppm (L/O). Resultados similares a los obtenidos en este bioensayo fueron reportados por Che *et al.* [22] los investigadores observaron que *I. galbana* produce una mayor cantidad de biomasa bajo condiciones de fotoperíodo de 18h:6h (L/O), también observaron un aumento en la producción de lípidos bajo esas condiciones de fotoperíodo, lo cual puede explicar el aumento en el peso de la biomasa, Matos *et al.* [19] mencionan que, el período de exposición a la luz tiene una influencia directa en la producción de biomasa seca en las microalgas, debido a que genera un aumento de la tasa metabólica,

que se traduce en un aumento en la producción de biocompuestos a partir de la fotosíntesis como almidón, proteínas y lípidos, la acumulación intracelular de estos, aumenta el peso de la célula y reduce el contenido de agua.

En otros estudios se ha observado que la exposición a regímenes de luz y oscuridad favorece la producción de biomasa seca en la microalga [24], pues la célula bajo condiciones de exposición a la luz más prolongadas seguidos por periodos cortos de oscuridad, produce mayor cantidad de energía durante la fase luminosa de la que se utiliza en la fase oscura de respiración (mantenimiento del metabolismo), este sobrante energético funciona como una reserva que la célula utiliza, para continuar con sus procesos metabólicos durante la fase oscura, el resultado de esto es un aumento en la producción de metabolitos primarios y secundarios que se acumulan dentro de la célula y reducen el contenido de agua [19] [15].

Otro de los aspectos que pueden producir un aumento en la biomasa (g/L) es la etapa en la cual se hace la cosecha de la biomasa, al respecto Yusof *et al.* [15]; Alishah *et al.* [23] mencionan que el contenido de agua en la célula puede verse afectado por el tamaño de las organelas celulares, el cual varía por la acumulación de almidón, proteínas y lípidos en el citoplasma los cuales derivan de la fotosíntesis, estos compuestos se acumulan en la célula de manera diferente dependiendo de la fase de crecimiento en la que se encuentre el cultivo, y pueden aumentar al entrar en fase de crecimiento estacionaria [25]. En esta investigación, la cosecha de la biomasa se realizó durante la fase estacionaria, lo cual coincide con el mencionado por los autores, y pudo tener una influencia sobre el peso seco de la biomasa.

Este bioensayo permitió establecer que los cultivos sometidos a luz azul muestran un incremento en la densidad celular cuando se encuentran bajo un fotoperiodo 24h (L/O), con salinidad de 28 ppm. Se observó también que, con luz azul, fotoperiodo 16h:8h (L/O) y salinidades de 32ppm y 28 ppm, hay una mayor producción de biomasa. El conocimiento generado permitirá mejorar las condiciones de cultivo implementadas en el Laboratorio de producción de Plancton Marino, donde se cultiva la especie como alimento acuícola, la reducción del periodo de exposición a la luz y el cambio en el color de luz empleado permitirá obtener una concentración de células por mL adecuada para la alimentación y favorecer los parámetros productivos de la microalga.

Referencias

- [1] L. A. Velasco, J. Barros-Gómez, G. H. Ospina-Salazar, and C. A. Trujillo, "Efecto de la intensidad lumínica, temperatura y salinidad sobre el crecimiento de la microalga *Isochrysis galbana* (clon T-ISO)," *Revista Intropica*, vol. 4, pp. 93–99, 2009, Accessed: Jan. 26, 2023. [Online]. Available: <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/142>
- [2] D. Lorenzo *et al.*, "Los lípidos en los peces y los aportes benéficos en la salud humana", *Kuxulkab*, vol. 23, no. 47, pp. 23–30, 2017, [Online]. Available: www.dgbiblio.unam.mx
- [3] C. Bonfanti *et al.*, "Potential of microalga *Isochrysis galbana*: Bioactivity and bioaccessibility," *Algal Res*, vol. 29, pp. 242–248, 2018, doi: 10.1016/j.algal.2017.11.035.
- [4] I. Barkia, N. Saari, and S. R. Manning, "Microalgae for high-value products towards human health and nutrition," *Marine Drugs*, vol. 17, no. 5, p. 304, 2019. doi: 10.3390/md17050304.
- [5] K. K. Sharma, H. Schuhmann, and P. M. Schenk, "High lipid induction in microalgae for biodiesel production," *Energies (Basel)*, vol. 5, no. 5, pp. 1532–1553, 2012, doi: 10.3390/en5051532.
- [6] W. S. Shin, S. M. Jung, C. H. Cho, D. W. Woo, W. Kim, and J. H. Kwon, "Use of tar color additives as a light filter to enhance growth and lipid production by the microalga *nannochloropsis gaditana*," *Environmental Engineering Research*, vol. 23, no. 2, pp. 205–209, 2018, doi: 10.4491/eer.2017.162.
- [7] F. Choix, "Evaluación de la acumulación de carbohidratos en la microalga *Chlorella* spp. Asociada con la bacteria *Azospirillum brasilense*," Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C, 2014.
- [8] W. Pugkaew, M. Meetam, K. Yokthongwattana, N. Leeratsuwan, and P. Pokethitiyook, "Effects of salinity changes on growth, photosynthetic activity, biochemical composition, and lipid productivity of marine microalga *Tetraselmis suecica*," *J Appl Phycol*, vol. 31, no. 2, pp. 969–979, 2019, doi: 10.1007/s10811-018-1619-7.

- [9] M. Atta, A. Idris, A. Bukhari, and S. Wahidin, "Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in freshwater microalgae *Chlorella vulgaris*," *Bioresour Technol*, vol. 148, pp. 373–378, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.08.162.
- [10] P. S. C. Schulze, L. A. Barreira, H. G. C. Pereira, J. A. Perales, and J. C. S. Varela, "Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production," *Trends in Biotechnology*, vol. 32, no. 8. Elsevier Ltd, pp. 422–430, 2014. doi: 10.1016/j.tibtech.2014.06.001.
- [11] M. del Pilar Sánchez-Saavedra, A. N. Maeda-Martínez, and S. Acosta-Galindo, "Effect of different light spectra on the growth and biochemical composition of *Tisochrysis lutea*," *J Appl Phycol*, vol. 28, no. 2, pp. 839–847, 2016, doi: 10.1007/s10811-015-0656-8.
- [12] P. Sirisuk, C. H. Ra, G. T. Jeong, and S. K. Kim, "Effects of wavelength mixing ratio and photoperiod on microalgal biomass and lipid production in a two-phase culture system using LED illumination," *Bioresour Technol*, vol. 253, pp. 175–181, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.01.020.
- [13] Y. Zhong, P. Jin, and J. J. Cheng, "A comprehensive comparable study of the physiological properties of four microalgal species under different light wavelength conditions," *Planta*, vol. 248, no. 2, pp. 489–498, 2018, doi: 10.1007/s00425-018-2899-5.
- [14] M. Yoshioka, T. Yago, Y. Yoshie-Stark, H. Arakawa, and T. Morinaga, "Effect of high frequency of intermittent light on the growth and fatty acid profile of *Isochrysis galbana*," *Aquaculture*, vol. 338–341, pp. 111–117, 2012, doi: 10.1016/j.aquaculture.2012.01.005.
- [15] N. S. Yusof, Y. S. Yeong, H. A. Zakeri, M. E. A. Wahid, S. N. A. Ghafar, and N. Yusof, "Photoperiod influenced the growth and antioxidative responses of *Chlorella vulgaris*, *Isochrysis galbana*, and *Tetraselmis chuii*," *J Appl Pharm Sci*, vol. 11, no. 4, pp. 125–134, Apr. 2021, doi: 10.7324/JAPS.2021.110415.
- [16] E. A. Suyono, A. Listyarini, and A. Hardiyati, "Effect High Salinity and Red-Blue Light Treatment on Lipid Content of the Microalgae *Chlorella zofingiensis* Dönz as Biodiesel Source," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 842, pp. 103–110, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.842.103.
- [17] C. H. Ra, P. Sirisuk, J. H. Jung, G. T. Jeong, and S. K. Kim, "Effects of light-emitting diode (LED) with a mixture of wavelengths on the growth and lipid content of microalgae," *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 41, no. 4, pp. 457–465, Apr. 2018, doi: 10.1007/s00449-017-1880-1.
- [18] B. O. Arredondo-Vega and D. Voltolina, *Concentración, recuento celular y tasa de crecimiento*, 1st ed. La Paz, Baja California, México: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/253237563>
- [19] Â. P. Matos, M. G. Cavanholi, E. H. S. Moecke, and E. S. Sant'Anna, "Effects of different photoperiod and trophic conditions on biomass, protein and lipid production by the marine alga *Nannochloropsis gaditana* at optimal concentration of desalination concentrate," *Bioresour Technol*, vol. 224, pp. 490–497, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.004.
- [20] M. Ono, K. Sawada, Y. Shiraiwa, and M. Kubota, "Changes in alkenone and alkenoate distributions during acclimatization to salinity change in *Isochrysis galbana*: Implication for alkenone-based paleosalinity and paleothermometry," 2012.
- [21] J. P. Cañavate, I. Hachero-Cruzado, C. Pérez-Gavilán, and C. Fernández-Díaz, "Lipid dynamics and nutritional value of the estuarine strain *Isochrysis galbana* VLP grown from hypo to hyper salinity," *J Appl Phycol*, vol. 32, no. 6, pp. 3749–3766, 2020, doi: 10.1007/s10811-020-02258-2.
- [22] C. A. Che, S. Kim, H. Hong, M. Kityo, I. Sunwoo, and J. Jeong, "Optimization of light intensity and photoperiod for *Isochrysis galbana* culture to improve the biomass and lipid production using 14-L photobioreactors with mixed light emitting diodes (LEDs) wavelength under two-phase culture system," *Bioresour Technol*, vol. 285, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121323.
- [23] H. Alishah Aratboni, N. Rafiei, R. Garcia-Granados, A. Alemzadeh, and J. R. Morones-Ramírez, "Biomass and lipid induction strategies in microalgae for biofuel production and other applications," *Microbial Cell Factories*, vol. 18, no. 1. BioMed Central Ltd., p. 178, 2019. doi: 10.1186/s12934-019-1228-4.
- [24] I. Krzemińska, B. Pawlik-Skowrońska, M. Trzcińska, and J. Tys, "Influence of photoperiods on the growth rate and biomass productivity of green microalgae," *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 37, no. 4, pp. 735–741, 2014, doi: 10.1007/s00449-013-1044-x.
- [25] M. Chioccioli, B. Hankamer, and I. L. Ross, "Flow cytometry pulse width data enables rapid and sensitive estimation of biomass dry weight in the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella vulgaris*," *PLoS One*, vol. 9, no. 5, pp. 1–29, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0097269.

Respuesta al fertirriego por goteo en arroz (*orriza sativa*, variedad conarroz 3) en el trópico húmedo costarricense

Response to the drip fertigation in paddy (*orriza sativa*, conarroz 3 variety) in the costarican humid tropic

Gregory Guevara¹, Alexander Mendoza²

Fecha de recepción: 2 de enero, 2023
Fecha de aprobación: 29 de abril, 2023

Guevara, G; Mendoza, A Respuesta al fertirriego por goteo en arroz (*orriza sativa*, variedad conarroz 3) en el trópico húmedo costarricense. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 102-113.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6570>

1 Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica.
Correo electrónico: gguevara@earth.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9056-9847>

2 Universidad EARTH, Guácimo, Costa Rica.
Correo electrónico: armendoza@earth.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7701-103X>

Palabras clave

Riego por goteo; fertirriego; arroz.

Resumen

El arroz es uno de los cultivos más extensamente producidos a nivel mundial, el desarrollo de paquetes tecnológicos que ayuden a aumentar su sostenibilidad conduce a impactos positivos en las economías y ambientes a nivel global. El Objetivo de este experimento es demostrar la eficacia en la productividad de la fertirrigación con goteo en la variedad Conarroz 3. Los Materiales y métodos usados fueron dos parcelas de 1000 m² cada una, donde se aplicaron diferentes niveles nutricionales, las mangueras de riego contaban con goteros de 40 cm, con flujo de 1 l·h⁻¹, espaciadas cada 1 m entre ellas. El experimento fue corrido en dos ciclos de producción para analizar el impacto de la variación climática en ambas ventanas de producción. Los Resultados demuestran que con dosis nutricionales al 100 % de su requerimiento, con fertirriego fue posible producir de 6.1 a 6.5 Ton·ha⁻¹ con un rendimiento hídrico de 8-7 kg·ha⁻¹·mm⁻¹ regado, la productividad superó en más del 15%, respecto lo obtenido en su testigo fertilizado de forma convencional al suelo. Se observó una respuesta de la variedad a la variación climática, donde la ventana de producción de mayo a setiembre mostró mejores resultados producto a mayores radiaciones y temperaturas durante el ensayo. Conclusión: es posible aumentar la producción vía fertirriego en la variedad Conarroz 3 y de esta forma introducir el riego por goteo en arroz como un instrumento para aumentar los rendimientos desde una perspectiva meramente nutricional.

Keywords

Drip irrigation; fertigation; rice.

Abstract

Rice is one of the most widely produced crops worldwide, the development of technological service packs that help to increase its sustainability leads to positive impacts on economies and environments at a global level. The objective of this experiment was to demonstrate the efficiency in the productivity of drip fertigation system in the Conarroz 3 variety. The materials and methods used were two plots of 1000 m² each, where different nutritional levels were applied, the irrigation hoses had drippers (40 cm spacing) with flow of 1 l·h⁻¹, spaced every 1 m between them. The experiment was run in two production cycles to analyze the climate impact on production. The Results has shown with nutritional doses applied to 100% of its requirement, with fertigation it was possible to produce 6.1 to 6.5 Ton·ha⁻¹ with a water yield of 8-7 kg·ha⁻¹·mm⁻¹ irrigated, the productivity exceeded in more than 15%, comparing to what could be obtained in a Control with conventionally fertilization applied to the soil. A response of the variety to climatic variation was observed, where the production window from May to September showed better yields results, it was produced by higher radiations and temperatures during the test. Conclusion: it is possible to increase production via fertigation in the Conarroz 3 variety and thus introduce drip irrigation in rice as an instrument to increase yields.

Introducción

El arroz (*Oryza sativa*L.), alimento básico de más de la mitad del planeta es fundamental para la seguridad alimentaria mundial [1], el incremento de su producción es un elemento esencial en la lucha contra el hambre y la desnutrición. El 90 % de la producción de arroz en el mundo se

concentra en los países asiáticos, América es el segundo continente en importancia en relación con la producción mundial de arroz del cual cualquier esfuerzo en su desarrollo impacta positivamente en la humanidad. [2]. En Costa Rica la superficie arrocera cubre más de 33 mil hectáreas en todo el país, donde cerca del 46% se riega, principalmente mediante métodos de inundación principalmente con la variedad Lazarroz FL que cubre cerca del 45% del territorio. [3].

El clima, el agua, la nutrición y la semilla son factores importantes en la productividad en este cultivo; estudiar sobre indicadores de producción como número de panículas, el número de granos por panícula, el peso del grano y la tasa de cuajado de semillas son cruciales para entender los motores del rendimiento del arroz [4] [5], además es crucial conocer de tecnologías que puedan generar su máximo aprovechamiento, como es el caso del fertirriego, el cual consiste en la aplicación controlada del agua y nutrientes en tiempo y forma utilizando riego por goteo, dotando de un flujo bajo de agua por punto de emisión y de forma directa al suelo y sin presión, lo que mejora la disponibilidad hídrica producto a la baja velocidad de aplicación en el suelo [6].

Los avances recientes en el cultivo de arroz de secano hacen que el manejo del cultivo aeróbico mediante fertirriego ahorre agua y aumente la productividad, pero para su éxito es necesario desarrollar nuevas variedades, prácticas de manejo, así como la programación óptima de los nutrientes para obtener un rendimiento rentable. Se ha demostrado que los métodos de riego por goteo y fertirrigación son los métodos más eficientes en cuanto a agua y nutrientes aplicados [7].

El propósito de este experimento es conocer el comportamiento productivo de la variedad de *Conarroz3*, la cual es una variedad promisoría, a diferentes dosis nutricionales aplicadas vía fertirriego en el caribe costarricense, donde por las condiciones de humedad constantes durante la producción, la variable más importante fue el método y cantidad de fertilizantes aplicados en fertirriego, siendo esta prueba especial para medir el impacto de la fertilización fracciona por el goteo.

Materiales y métodos

Descripción del área experimental

En el Laboratorio de Fertirriego de la Universidad EARTH, ubicado en Guácimo de Limón, zona atlántica de Costa Rica, el experimento fue conducido en dos ciclos de producción entre los meses de mayo a setiembre del año 2020 el primero y de diciembre 2020 a abril 2021 en segundo. Durante el periodo experimental las condiciones climáticas fueron monitoreadas y evaluadas y con los parámetros promedio de la zona, típicos de un clima tropical húmedo [8].

Para la implementación del proyecto se realizaron labores culturales para la correcta preparación del área. El suelo fue labrado usando tractores de 80 Hp, se dio un pase de labranza primaria con rastra de disco a una profundidad de 20 cm y suelo se realizó el afinado del terreno y construcción de surcos a 20 cm de espaciamiento usando arado vibrador a 20 cm de espaciamiento. Previo a la colocación de la semilla se realizó una aplicación de herbicida pre-emergente. La siembra y tapado fue manual y posterior a ella se colocaron las mangueras de riego por goteo, se conectó el sistema de riego y se llevó el suelo a capacidad de campo; los diferentes tratamientos fueron monitoreados en su desarrollo a los 30, 60, 95 y 120 días después de siembra, se muestra en la figura 1.



Figura 1. fotos del proceso de experimento en campo.

El área experimental asignada fue de 2000 m², el diseño experimental seguido fue de parcelas subdivididas [9] [10] y siguiendo el modelo citado por [11]. El campo estuvo formado por dos bloques principales de fertirriego de 1000 m² cada uno controlados por válvulas de riego automáticas, a lo interno de los bloques los laterales de riego por goteo fueron de 16 mm con goteros a 40 cm y extendidos a un espaciamiento de 1.0 m, su conexión a la tubería secundaria se dio a través de válvulas laterales de polietileno para realizar el control de los tratamientos nutricionales (figura 2). Las válvulas de riego estaban conectadas un cabezal de inyección de fertilizante automático con 3 tanques de fertilización para el control de la disolución e inyección de fertilizantes, se controló una proporción de inyección de 10 a 12 litros de fertilizante por metro cúbico de agua inyectada, garantizando inyecciones de fertilizante de más de 3 horas por fertirriego buscando que el fertilizante se distribuya de mejor forma en el perfil de suelo y no quede solo en la zona próxima a las mangueras.

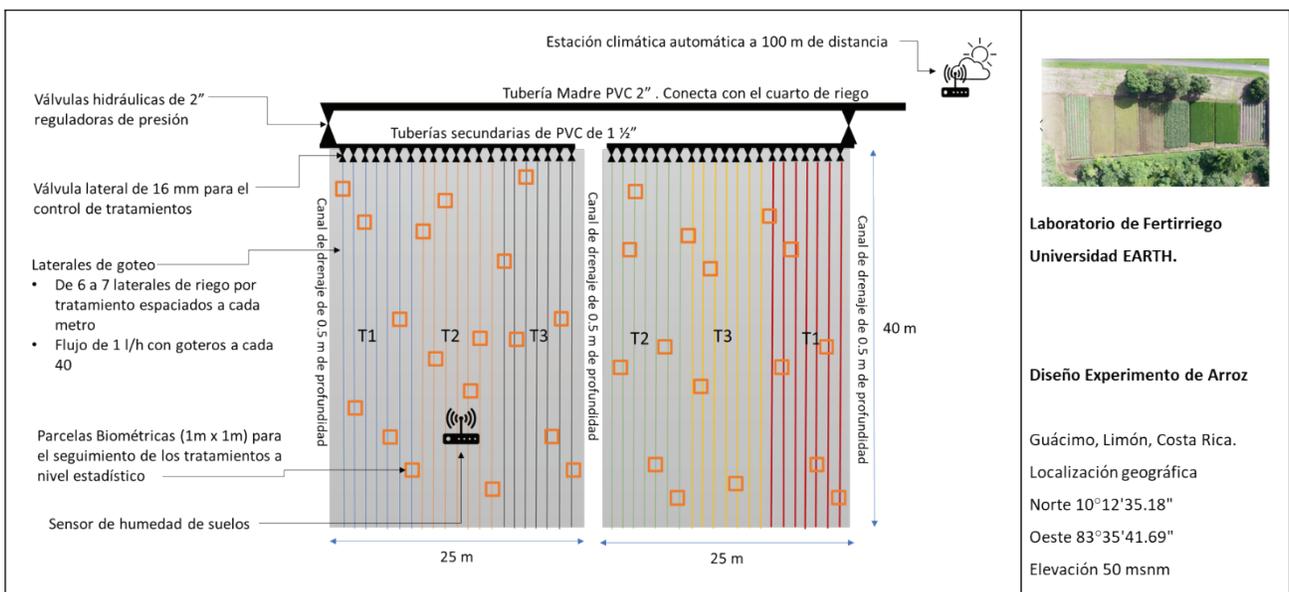


Figura 2. Detalle de distribución del área y componentes del experimento.

Cada bloque contempla un número de 6 a 8 parcelas de 1 m², distribuido de forma aleatoria a lo interno de cada uno de los bloques, estas parcelas son útiles para el seguimiento de biometrías de crecimiento y los estudios de varianza para la productividad de cada uno de los tratamientos.

Los suelos del proyecto son de origen aluvial de textura franco-arcillosa, con bajo contenido de material orgánica y de fertilidad limitada. Se levantaron muestras de suelo y fueron evaluadas en laboratorio antes de cada ciclo de producción y los resultados químicos mostraron que elementos mayores como el fósforo (2.5 cmol₍₊₎·l⁻¹) y el potasio (0.31 cmol₍₊₎·l⁻¹) su disponibilidad es baja, de igual forma suceden con elementos menores como magnesio y calcio con valores de 1.11 y 3.07 cmol₍₊₎·l⁻¹ respectivamente .

El carácter experimental del proyecto demanda presión en la cantidad y distribución de los nutrientes, el sistema de riego constaba de mangueras con emisores auto compensados de 1 l·h⁻¹, espaciados a 40 cm entre ellos aplicando el agua con una intensidad de riego de 2.5 mm·h⁻¹. La precisión del riego fue monitoreada mediante pruebas de uniformidad [12] [6], durante los inicios de ciclos de producción y el coeficiente de uniformidad (CU) y distribución (DU) fueron superiores a 95% (figura 3)

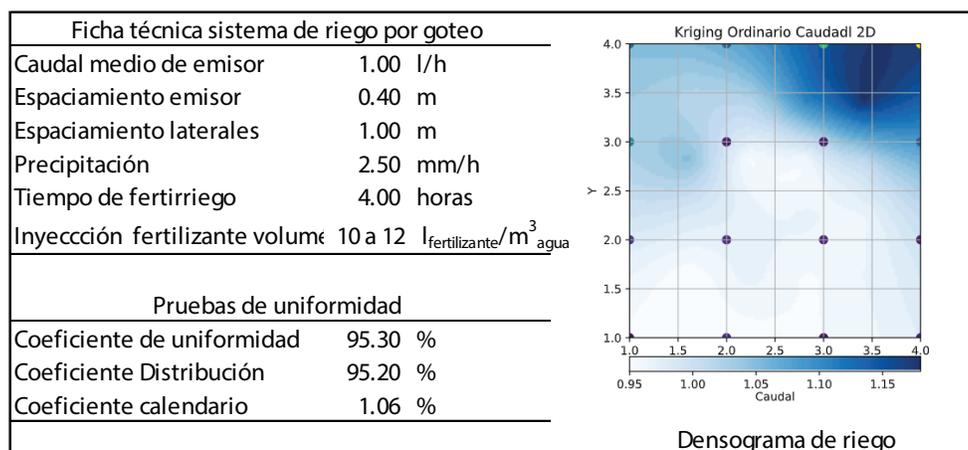


Figura 3. Desempeño del sistema de riego y su uniformidad.

Descripción de los tratamientos

Partiendo de la base de una fertilidad deficiente del suelo se procedió a establecer el plan de nutrición, además debido a la falta de información de extracción nutricional de la variedad *Conarroz3*, se revisaron diferentes fuentes bibliográficas que hablan sobre el tema de curvas de absorción [13] [14] y fertilidad del arroz [5][15], así como otras experiencias de aplicación nutricional por fertirriego [16] , [17]; de esta revisión se estableció el plan de manejo nutrición que se muestra en el cuadro 1, el *plan 100%* basado en su aporte nutricional está diseñado para una producción de 6 Ton·ha⁻¹, *los planes 75% y 130%* son tratamientos de rango, para observar la respuesta en productividad del cultivo a este rango de nutrición vía fertirriego.

Cuadro 1. Planes de fertilización para los tratamientos

Elemento	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
Kg·ha ⁻¹						
Plan 75 %	100	23	100	23	9	42
Plan 100 %	133	31	133	31	12	57
Plan 130 %	174	40	174	40	16	75

Los experimentos fueron conducidos en dos ventanas de producción, la primera con siembra el 15 de mayo y cosecha 23 de setiembre 2020, mientras tanto el segundo ciclo con siembra el 15 de diciembre y cosecha el 27 de abril del año 2021.

Los tratamientos de los diferentes planes nutricionales vía sistema de riego por goteo se muestra en cuadro 2: en el primer ciclo de producción se trabajó dos planes de fertirriego, F100 y F75 que aplica el plan de nutrición al 100% y 75% respectivamente de lo estimado, además se propuso un tratamiento testigo T100 donde la aplicación del fertilizante será de forma sólida al suelo en tres momentos de producción, de forma similar como lo aplica un productor en la zona; el segundo ciclo los tratamientos de fertirriego fueron el F100 y F130 (plan de nutrición al 100 y 130 % respectivamente y de forma idéntica se repitió el tratamiento del testigo, el cual nos permitirá identificar la variabilidad de la producción en respuesta de los cambios de parámetros climáticos. Siempre en los tratamientos testigo, a pesar de que no hubo fertirriego, se instala manguera de goteo para el control del agua aplicada y que todos los tratamientos reciban la misma cantidad de milímetros de agua en el ciclo, además en todos los tratamientos la fertilización de fósforo fue 100% aplicada al suelo, partiendo del principio de que la movilidad de fosforo es lenta [18]

Cuadro 2. Tratamientos nutricionales.

Ciclo	Tratamiento	Fertilización al suelo (% según el plan)	Fertirriego (% según el plan)
Primero. Siembra 15 de mayo, cosecha 23 de setiembre 2020	F100	100% P ₂ O ₅ a la siembra	100% del resto de elemento aplicado en 10 riegos fertirriegos
	F75	100% P ₂ O ₅ a la siembra	75% del resto de elemento aplicado en 10 riegos fertirriegos
	T100	100% P ₂ O ₅ a la siembra El resto de elemento distribuidos a los 25, 45, 60 días	
Segundo. Siembra 15 de diciembre, cosecha 27 de abril 2021	F100	100% P ₂ O ₅ a la siembra	100% del resto de elemento aplicado en 8 riegos fertirriegos
	F130	100% P ₂ O ₅ a la siembra	130% del resto de elemento aplicado en 8 riegos fertirriegos
	T100	100% P ₂ O ₅ a la siembra El resto de elemento distribuidos a los 25, 45, 60 días	

Control del clima y riego

El experimento por estar a campo abierto y correrse en dos momentos temporales diferentes, hizo necesario un monitoreo preciso de las variables climáticas, se colectaron datos en una estación meteorológica marca Davis modelo Vantage Pro 2; el resumen de las principales variables atmosféricas durante el experimento se muestran en el cuadro 3, se observa un marcado descenso en la radiación para el segundo ciclo, producto a días más cortos, además de un descenso de las temperaturas producidas por el aumento de los vientos alisios del primer semestre del año, el resultado de esta variación resulto un descenso del evapotranspiración lo que indica que la demanda hídrica se reduce [19]. Los datos climáticos fueron de utilidad para comparar los resultados entre ciclos y así observar el potencial productivo de la variedad en los diferentes rangos climáticos que caracterizan la región caribe.

Cuadro 3. Datos climáticos durante el ensayo.

Parámetro		unidad	Primer ciclo May-Set	Segundo ciclo Dic-Abr	Δ entre el primero y segundo ciclo
Temperatura	media	°C	25.82	24.72	-4%
	máximo	°C	20.06	17.61	-12%
	mínimo	°C	33.65	33.11	-2%
Radiación	media diario	W·m ⁻²	386.56	326.64	-16%
	acumulada	W·m ⁻²	50.566	43.684	-14%
Evapotranspiración potencial (Penman Monteith)	media diaria	mm·día ⁻¹	3.50	2.62	-25%
	máximo	mm·día ⁻¹	5.52	4.49	-18%
	mínimo	mm·día ⁻¹	1.05	0.70	-33%
	acumulada	mm	458.5	351.08	-23%

Durante el experimento el campo siempre mantuvo condiciones de humedad favorable, todos los tratamientos, inclusive los testigo tuvieron mangueras de goteo, para garantizar la humedad uniforme entre los tratamientos, durante los ciclos de producción se realizaron riegos y fertirriegos que son resumidos en el figura 4 (a) y (b), en ambas gráficas la curva de acumulación de agua en el experimento, que suma el acumulado de los riegos más la suma acumulada de las precipitaciones efectivas, siempre estuvo por encima de la curva de la evapotranspiración acumulada garantizando que el área estuvo por encima del requerimiento.

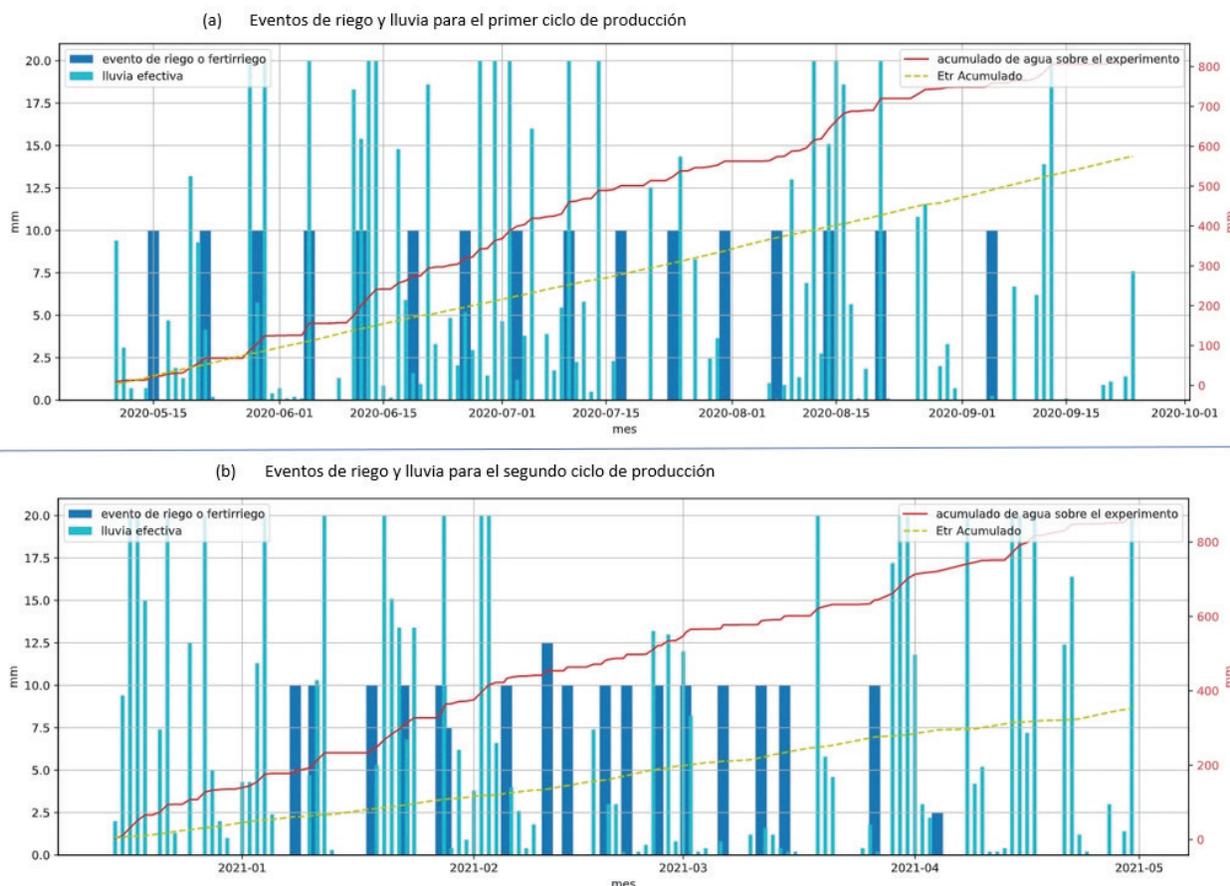


Figura 4. relaciones hidrológicas durante los experimentos.

Resultados

Los rendimientos productivos de los tratamientos, en términos de peso de gramo por unidad de área, expusieron diferencias significativas, el cuadro 4 muestra que tanto en primer como segundo ciclo de producción los resultados productivos fueron de forma lineal a la nutrición, los tratamientos F100 y F130 basados en una nutrición completa al 100 y 130 % del requerimiento reflejaron mejores resultados que F75 el cual solo recibió el 75% de la nutrición; de forma similar podemos analizar el comportamiento de los tratamientos F100 en ambos ciclos de producción versus los testigos T100, obtienen mejores resultados productivos por su manejo vía fertirrigación. Otros datos de la cosecha, mostrados en el cuadro 4, como la cantidad de panículas por grano, peso de los 1000 granos y peso de raíces no mostraron diferencias en sus resultados, pero los mismo son valiosos para el análisis comparativo del experimento.

Cuadro 4. Resultados de la cosecha de por tratamiento.

Ciclo de producción	Tratamiento	Peso de granos en campo		Cantidad de granos por panícula		peso de 1000 granos		Peso raíces	
		g·m ⁻²		und		g		g	
May. 2020 a Set. 2020	F100	652.14 ± 33.03	A	209.28 ± 20.85	A	20.83 ± 0.91	A	10.56 ± 0.93	A
	F75	507.38 ± 32.38	B	148.48 ± 17.24	B	21.35 ± 0.68	A	10.57 ± 0.99	A
	T100	582.67 ± 30.45	A-B	139.80 ± 2.44	B	22.62 ± 0.53	A	12.44 ± 0.83	A
	p-value	0.012		0.0186		ns		ns	
Dic. 2020 a Abr. 2021	F130	646.50 ± 14.75	a	122.75 ± 16.32	a	22.13 ± 0.31	a	11.42 ± 0.33	a
	F100	612.25 ± 32.67	a	110.88 ± 7.15	a	23.13 ± 0.61	a	15.75 ± 0.77	b
	T100	508.00 ± 21.57	b	104.38 ± 9.85	a	22.63 ± 0.46	a	14.73 ± 1.14	b
	p-value	0.016		ns		ns		0.0051	

Nota: Todos los datos presentados son la media de mediciones ± el error estándar. En las columnas valores con letras similares son estadísticamente iguales, según prueba varianza por el método de Tukey ($p \leq 0.05$). Los análisis de varianza fueron corridos de forma independientes según el ciclo de producción, por eso los resultados del primer ciclo se identifica con letras mayúsculas y los resultados del segundo ciclo se identifican con letras minúsculas.

Los tratamientos que fueron replicados en el primer y segundo ciclo de producción T100 y F100, mostraron mejores resultados de productividad en el primer ciclo de producción (cuadro 4), lo cual es algo esperado por el mayor nivel de radiación y temperatura (cuadro 3) favoreciendo el crecimiento del arroz, afirmando la idea que la producción del cultivo se debe expresar en un rango, que como se observa puede ser de un 6 a 12% de variación entre temporadas.

En el cuadro 5 los tratamientos T100 y F100 que fueron idénticos nutricional entre sí, se muestran la relación de productividad de granos por de unidad de agua que fue requerida y precipitada en el experimento, este ratio nos permite a partir de las experiencias de dos ciclos de producción, con regímenes de riegos, precipitaciones y evapotranspiración diferente (figura 4) analizar la cantidad de agua consumida y de esta forma compararlo con otras experiencias. La cantidad precipitada en los ensayos fue similar entre los ciclos, por lo tanto la relación de productividad en unidades de $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ (agua aplicada) dan mejores relaciones hídricas en el primer ciclo de producción (mayo a setiembre), resultado de una rendimiento mayor de

campo durante esta ventana de crecimiento y optimizando el milímetro de agua aplicado, debe recordarse que el experimento se desarrolló bajo condiciones tropicales con un aporte hídrico que superó el requerimiento (figura 4). Además, el segundo ratio en unidades de $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}_{(\text{Etr})}$, el cual considera lo que realmente la plantación requirió como evapotranspiración real, en este segundo caso los ratios o índice de productividad por unidad volumétrica de agua requerida da más favorable en para la segunda ventana de producción (diciembre a abril) producto a un menor valor de evapotranspiración, haciendo esta ventana más resiliente a stress hídrico.

Cuadro 5. Relación producción versus agua precipitada en el experimento en el experimentos.

Ciclo de producción	Trat.	Peso de granos en campo	Total de agua aplicado*	ETR acumulada	Ratio (Kg de arroz producido por unidad de agua)	
		gr/m^2	mm^*	mm	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}_{(\text{agua aplicada})}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}_{(\text{Etr})}$
May. 2020 a Set. 2020	F100	652.14	802	580	8.2	11.1
	T100	582.67			7.3	10.0
Dic. 2020 a Abr. 2021	F100	612.25	849	380	7.2	16.1
	T100	508.00			0.6	13.4

*Es la suma del riego más la precipitación

Discusión

Los resultados encontrados en términos de productividad muestran rendimientos que van desde los $5.5 \text{ Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ en los tratamientos testigo, hasta valores cercanos a los $6.5 \text{ Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ para los tratamiento T100 y T130 en los cuales nutrientes aplicados vía fertirriego lograron levantar la productividad hasta en 15%, la aplicación controlada de nutrientes en el suelo permitió una mejor absorción [7][20], reduciendo las pérdidas nutricionales producto a la escorrentía, percolación y volatilización [21] [22]. En la cosecha de los tratamientos se observó un comportamiento directamente proporcional a la productividad en función de la cantidad de nutrientes invertidos, tal como lo citan experiencias similares de manejo del fertirriego en arroz en India ([23] [11], en China [16] e Italia ([24]. Hay que destacar que los tratamientos nutricionales fueron hechos en niveles, el experimento demuestra una mayor eficacia del goteo, pero no concluye con su dosis nutricional donde es recomendado trabajar curvas de absorción para la variedad en específico.

El peso de los mil granos presentado en la cuadro 4, a pesar de que no hubo diferencias significativas fueron resultados similares a los encontrados en otras investigaciones donde ni el riego ni la nutrición infieren de una forma directa en el peso del grano, pero si de la cantidad de granos por panícula que se pueden presentar [23]. Estos son datos que caracterizan la variedad y permiten introducir algunos otros parámetros agroindustriales [25]

[26] [7] entre otros autores citan que el peso y crecimiento de las raíces puede usarse como un buen indicador de la nutrición de los cultivos, en el caso de nuestros experimentos cuadro 4 muestran para el primer ciclo de producción un comportamiento predecible donde F100 da el volumen de raíces mayores sin que sus diferencias sean significativas, en el segundo ciclo de producción el resultado es contrario a lo esperado, pero podría deberse a variables específicas de las áreas muestrales.

Los indicadores sobre la cantidad de agua aplicada en el experimento cuadro 5, muestran que se logró producir de 8 a 6 kg de arroz por milímetro de agua aplicado en una hectárea, el resultado es consistente con las experiencias en China donde se reportan de 7 a 6 kg·m⁻¹·mm⁻¹ (agua aplicada) [16], también en India los experimentos [23] reportan indicadores similares, otros investigaciones en riego por goteo y arroz demuestran rendimientos muy eficaces, alcance rendimiento de arroz de 8.9 kg·m⁻¹·mm⁻¹ (agua aplicada) comparado con 2.5 kg·m⁻¹·mm⁻¹ (agua aplicada) en condiciones de riego por inundación [27]. Finalmente, esta eficacia de agua también tiene un impacto en la reducción de la huella de carbono de la producción del arroz, en este trabajo no se aborda este tema, pero las experiencias de [28] y [29] indica que sistemas de riego por goteo en arroz pueden alcanzar una reducción de hasta el 50% en las emisiones de dióxido de carbono equivalente.

Conclusiones

Se observó que los tratamientos nutricionales vía fertirriego en los cuales las dosis eran iguales al testigo de aplicación granular al suelo, los resultados de productividad fueron significativamente diferentes, demostrando una mayor eficacia en la absorción de los nutrientes en el suelos cuando se aplica el fertilizante de forma fraccionada vía fertirriego, la temporada de producción de mayo a setiembre obtuvo mejores resultados de productividad, gracias a una mayor incidencia en la radiación, pero sin importar la época del año se observó una mejor respuesta de producción en el cultivo en los tratamientos de fertirriego.

En las dosis con mayor nutrición vía fertirriego no se obtuvo diferencias significativas con respecto a la dosis 100% según recomendación a una curva de absorción, validando que es la dosis al 100% cubre los requerimientos nutricionales para la variedad en estudio.

Por la importancia en los resultados se recomienda continuar la investigación en miras de afinar los paquetes nutricionales además de replicar el ensayo en otras condicionales agroecológicas que permitan identificar espacios donde la introducción de la tecnología sea de un mayor impacto también por el riego.

Agradecimiento

Los autores agradecen de forma especial a Shewarega Kibru y David Guzman de la promoción 2020 y a Alex Mejia y Francisco Moteroso de la promoción 2021 de la Universidad EARTH por ser actores claves en el diseño y ejecución de los experimentos de campo. Al Ing. Oswaldo Ledezma de la Corporación Arrocera Nacional por su apoyo técnico a lo largo del proyecto y al Ing. Adrian Vargas Obando por su asesoría en el manejo de la automatización y monitoreo de los tratamientos durante el experimento.

Referencias

- [1] P. A. Seck, A. Diagne, S. Mohanty, and M. C. S. Wopereis, "Crops that feed the world 7: Rice," *Food Security*, vol. 4, no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1007/s12571-012-0168-1.
- [2] FAO, "El Arroz y la Nutrición Humana," in *FAO Rice Conference*, 2004, no. Cuadro 1.
- [3] CONARROZ, "Informe Anual Estadístico 2019-2020," San José, 2020.
- [4] A. Fukushima, I. Perera, K. Hosoya, T. Akabane, and N. Hirotsu, "Genotypic differences in the effect of p fertilization on phytic acid content in rice grain," *Plants*, vol. 9, no. 2, 2020, doi: 10.3390/plants9020146.
- [5] T. Ye *et al.*, "Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization affects the flowering time of rice (*Oryza sativa* L.)," *Global Ecology and Conservation*, vol. 20, 2019, doi: 10.1016/j.gecco. 2019.e00753.
- [6] P. Waller and M. Yitayew, *Irrigation and Drainage Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-05699-9.

- [7] M. M. Keerthi, R. Babu, N. S. Venkataraman, and P. P. Mahendran, "Influence of Irrigation Scheduling with Levels and Times of Nitrogen Application on Root Growth of Aerobic Rice," *American Journal of Plant Sciences*, vol. 09, no. 11, 2018, doi: 10.4236/ajps.2018.911166.
- [8] J. Solano and R. Villalobos, "Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica," San José , 2000.
- [9] A. González Huerta, D. D. J. Pérez López, M. Rubí Arriaga, F. Gutiérrez Rodríguez, J. R. P. Franco Martínez, and A. Padilla Lara, "InfoStat, InfoGen y SAS para contrastes mutuamente ortogonales en experimentos en bloques completos al azar en parcelas subdivididas," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 10, no. 6, Sep. 2019, doi: 10.29312/remexca.v10i6.1767.
- [10] F. Soto-Bravo and M. I. González-Lutz, "Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas," *Agronomía Mesoamericana*, May 2019, doi: 10.15517/am.v30i2.33839.
- [11] V. Ramulu, V. P. Rao, M. U. Devi, K. A. Kumar, and K. Radhika, "Evaluation of drip irrigation and fertigation levels in aerobic rice for higher water productivity," *2nd World Irrigation Forum, November 6-8, 2016, Chiang Mai, Thailand*, no. November 6-8, 2016, Chiang Mai, Thailand W.3.1.02, 2016.
- [12] L. Juana, L. Rodríguez-Sinobas, R. Sánchez, and A. Losada, "Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units," *Agricultural Water Management*, vol. 90, no. 1–2, May 2007, doi: 10.1016/j.agwat.2007.01.007.
- [13] L. A. Barahona-Amores, J. E. Villarreal-Núñez, W. González-Carrasco, and E. I. Quiro-McIntire, "Absorption of nutrients in rice in an inceptisol soil under irrigation in Coclé, Panamá," *Agronomy Mesoamerican*, vol. 30, no. 2, pp. 407–424, 2019, doi: 10.15517/am.v30i2.33997.
- [14] E. Molina and J. Hernán Rodríguez, "FERTILIZACIÓN CON N, P, K y S, y CURVAS DE ABSORCIÓN DE NUTRIMENTOS EN ARROZ VAR. CFX 18 EN GUANACASTE," 2012. [Online]. Available: www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr
- [15] H. S. Sidhu *et al.*, "Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: A breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency," *Agricultural Water Management*, vol. 216, 2019, doi: 10.1016/j.agwat.2019.02.019.
- [16] M. A. Adekoya *et al.*, "Agronomic and Ecological Evaluation on Growing Water-Saving and Drought-Resistant Rice (*Oryza sativa* L.) Through Drip Irrigation," *Journal of Agricultural Science*, vol. 6, no. 5, 2014, doi: 10.5539/jas.v6n5p110.
- [17] T. Parthasarathi, K. Vanitha, S. Mohandass, and E. Vered, "Evaluation of drip irrigation system for water productivity and yield of rice," *Agronomy Journal*, vol. 110, no. 6, 2018, doi: 10.2134/agronj2018.01.0002.
- [18] Y. Tapia-Torres and F. García-Oliva, "Phosphorus Availability is a Product of Soil Bacterial Activity in Oligotrophic Ecosystems: a Critical Review," *Terra Latinoamericana*, vol. 31, no. 3, pp. 231–242, 2013.
- [19] R. Villalobos and N. Rojas, "Descripción del clima del cantón de Limón ," San José , 2016.
- [20] T. Talaviya, D. Shah, N. Patel, H. Yagnik, and M. Shah, "Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides," *Artificial Intelligence in Agriculture*, vol. 4, 2020, doi: 10.1016/j.aiia.2020.04.002.
- [21] P. K. Singh, P. C. Srivastava, R. Sangavi, P. Gunjan, and V. Sharma, "Rice water management under drip irrigation: an effective option for high water productivity and efficient zinc applicability," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/336032215>
- [22] T. F. Han *et al.*, "Variation in rice yield response to fertilization in China: Meta-analysis," *Scientia Agricultura Sinica*, vol. 52, no. 11, 2019, doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.11.007.
- [23] S. K. Natarajan, V. K. Duraisamy, G. Thiyagarajan, and M. Manikandan, "Evaluation of Drip Fertigation System for Aerobic Rice in Western Zone of Tamil Nadu," *International Journal of Plant & Soil Science*, 2020, doi: 10.9734/ijpss/2020/v32i730303.
- [24] S. Monaco, P. Bottazzi, and F. Altobelli, "Performance of different rice varieties under drip irrigation," 2020. doi: 10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277628.
- [25] P. Cordero Flores and F. Manzaneda Delgado, "Evaluación agronómica de seis variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) sembradas en dos épocas bajo riego, en el municipio de San Buenaventura, Bolivia," *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, vol. 8, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.53287/xivu8492oe20n.
- [26] T. Parthasarathi, K. Vanitha, S. Mohandass, E. Vered, and V. Meenakshi, "Variation in rice root traits assessed by phenotyping under drip irrigation," *F1000Res*, vol. 6, 2017, doi: 10.12688/f1000research.9938.1.

- [27] N. Beser, H. Surek, S. Sahin, R. Kaya, B. Tuna, and R. Cakir, "An investigation of various drip irrigation treatments in rice (*Oryza sativa* L.)," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 25, no. 9, 2016.
- [28] T. Parthasarathi, K. Vanitha, S. Mohandass, and E. Vered, "Mitigation of methane gas emission in rice by drip irrigation," *F1000Res*, vol. 8, 2019, doi: 10.12688/f1000research.20945.1.
- [29] R. Joshi, "Aerobic rice: Water use sustainability," *Oryza Vol. 46. No.1, 2009* , vol. 46, no. 1, 2009, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/215894471>

Modelos de control de acceso más utilizados en la seguridad de datos médicos

Access control models most used in medical data security

Brian Campos-Montero¹, Cesar Rodríguez-Sandoval², Alberto Mendoza de los Santos³

Fecha de recepción: 15 de enero, 2023
Fecha de aprobación: 17 de mayo, 2023

Campos-Montero, B; Rodríguez-Sandoval, C; Mendoza de los Santos, A. Modelos de control de acceso más utilizados en la seguridad de datos médicos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 114-127.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6558>

- 1 Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Trujillo. Perú.
Correo electrónico: bcampos@unitru.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0003-4198-9161>
- 2 Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Trujillo. Perú.
Correo electrónico: crodriguez@unitru.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-3471-3557>
- 3 Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Trujillo. Perú.
Correo electrónico: amendezad@unitru.edu.pe
<https://orcid.org/0000-0002-0469-915X>

Palabras clave

Control de acceso; esquema; modelo; seguridad; datos médicos.

Resumen

El acceso no autorizado a datos sensibles de pacientes es un problema que atenta contra ellos mismos y la seguridad de las organizaciones dedicadas al servicio de salud, para lo cual es fundamental implementar controles de acceso (CA), los cuales deben impedir el acceso y uso malintencionado de los datos, por ese motivo se hizo una investigación basada en revisión sistemática, utilizando como metodología a Prisma; además, se utilizó SCOPUS como base de datos incluyendo 82 artículos, que sirvieron para encontrar los modelos de control de acceso más utilizados; por consiguiente, se identificó 5 modelos que fueron los más utilizados (ABE, ABAC, RBAC, BBAC y MAC), representando un total del 52% de todos los estudios revisados, mientras que un 29% pertenecía a los que se implementaron una única vez y el 19% restante a las que surgieron por la solución de problemas identificados dentro de los 5 modelos de uso frecuente.

Keywords

Access control; scheme; model; security; medical data.

Abstract

Unauthorized access to sensitive patient data is a problem that threatens themselves and the security of organizations dedicated to the health service, for which it is essential to implement access controls (CA), which must prevent access and use malicious data, for this reason an investigation was carried out based on a systematic review, using Prisma as a methodology; In addition, SCOPUS was used as a database including 82 articles, which served to find the most used access control models; therefore, 5 models were identified that were the most used (ABE, ABAC, RBAC, BBAC and MAC), representing a total of 52% of all the studies reviewed, while 29% belonged to those that were implemented only once and the remaining 19% to those that arose from solving problems identified within the 5 frequently used models.

Introducción

En el sector de salud los datos médicos o los datos de pacientes son generados en grandes cantidades y son utilizados por diferentes actores de un sistema, por lo cual aquellos datos deben ser confidenciales y no deben ser compartidos a través de una red pública; sin embargo, el intercambio de datos de pacientes es necesario debido a que los médicos al encontrarse en diferentes ubicaciones físicas necesitan tomar decisiones con ayuda de la opinión de otros expertos, sin embargo, la privacidad de los datos es la principal preocupación, por lo cual dicho intercambio debe tener lugar en un proceso seguro y autenticado [1]. Por lo tanto, la seguridad de datos médicos debe enfocarse principalmente en proporcionar un equilibrio entre los riesgos de confidencialidad, integridad y disponibilidad [2]. Seguidamente, cabe mencionar primero que la confidencialidad se asegura de que ningún usuario no autorizado acceda a datos o recursos, segundo que la integridad se asegura de que los datos o recursos estén en su forma original y no sean modificados de forma intencional o accidental y por último la disponibilidad de recursos se asegura de que los datos o recursos estén accesibles y listos para su uso [3]. Para ello, es necesaria la implementación de controles de acceso (CA), ya que logran evitar el acceso ilegal a la información [2].

Un control de acceso está conformado por las fases de identificación, autorización y autenticación. En la fase de identificación, el usuario puede usar credenciales y autenticarse, después de proporcionar las credenciales correctas, el usuario queda autorizado para acceder solo a los recursos otorgados por un administrador a través de permisos o reglas de control de acceso; en conclusión, un control de acceso busca preservar la seguridad de los datos médicos, controlando el acceso a través de permisos a datos y recursos confidenciales. Además, cuando nos referimos a controles de acceso surge el concepto de modelos de control de acceso los cuales son representaciones formales de políticas de seguridad y mediante los cuales dichas políticas son implementadas y diseñadas de acuerdo a los escenarios y necesidades de la industria. [3]

Aquellos modelos también están relacionados con los privilegios que tiene una entidad al manejar objetos de datos particulares. Estos están basados en modelos de CA de identidad de usuario, como el control de acceso basado en roles (RBAC), control de acceso obligatorio (MAC) y control de acceso discrecional (DAC). Además de estos enfoques estáticos, se ha desarrollado el paradigma de control de acceso basado en atributos (ABAC), que es de naturaleza dinámica y flexible [4].

A los modelos de CA también se les conoce bajo la denominación de esquemas de control de acceso, de los cuales se han presentado muchos que adoptan el cifrado basado en atributos (ABE) para el CA detallado. Los usuarios con atributos que cumplan con la política de acceso pueden descifrar los datos de registros médicos. Los esquemas de control de acceso basados en roles (RBAC) también permiten un CA detallado. Definen una política basada en roles para una organización jerárquica con cifrado de transmisión basado en identidad (HIBBE). Si bien las propuestas anteriores logran la confidencialidad de los datos médicos, la preservación de la privacidad de los pacientes sigue siendo un problema sin resolver. Sin embargo, al existir una falta de consideración con respecto a la privacidad de la identidad de los propietarios de registros médicos electrónicos, se pueden utilizar técnicas de anonimización para garantizar la privacidad de la identidad de los usuarios. Existen algunos esquemas ABE anónimos que abordan no solo la privacidad de los datos sino también la privacidad de la identidad; por ende, aquellos esquemas proporcionan un análisis de confidencialidad, anonimato y flexibilidad [76].

Metodología

Se llevó a cabo una revisión sistemática sobre toda la literatura científica encontrada, con el fin de rescatar la información más importante respecto al tema sobre modelos de control de acceso, con base en la adaptación de la metodología denominada PRISMA. La pregunta planteada para la investigación que fue desarrollada bajo el proceso metodológico elegido fue: ¿Cuáles son los modelos de control de acceso más utilizados en la seguridad de datos médicos entre los años 2017 y 2022?

Fundamentación de la metodología

Las revisiones sistemáticas se basan en resúmenes presentados de forma clara y bien estructurada acerca de un tema de investigación específico, orientada a dar respuesta a una interrogante planteada a partir de un problema o tema de investigación. Además representan el más alto grado de evidencia debido a que están respaldadas por una variedad de fuentes de información con contenido verídico y confiable.

Proceso de recolección de información

Para la presente investigación se utilizó como base de datos a SCOPUS. El rango de años de búsqueda permitido incluyó publicaciones de los últimos cinco años, desde el 2017 hasta el 2022. Para el proceso de búsqueda de información, se partió de la pregunta de investigación planteada y se emplearon los siguientes términos: “Access control”, “Medical data”, “Medical record”, “Security”. Para lograr mayor efectividad en los resultados de la búsqueda, se realizaron muchas combinaciones entre los términos establecidos; además, se hizo uso de los operadores booleanos tal como se aprecia a continuación:

SCOPUS

(TITLE (“access control”) AND (TITLE-ABS-KEY (“medical data”) OR TITLE-ABS-KEY (“medical record”) OR TITLE-ABS-KEY (health))) AND PUBYEAR > 2016 AND (LIMIT-TO (OA , “all”)) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , “final”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , “ar”)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , “English”) OR LIMIT-TO (LANGUAGE , “Portuguese”) OR LIMIT-TO (LANGUAGE , “Spanish”))

Criterios de exclusión e inclusión

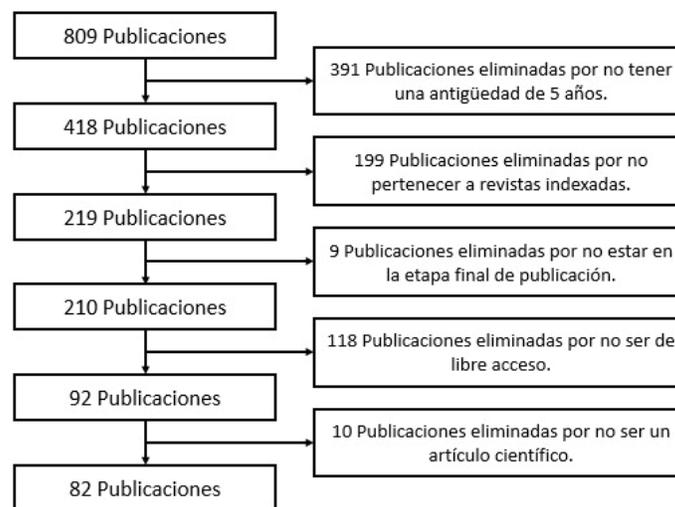


Figura 1. Diagrama de flujo de criterios de exclusión e inclusión de artículos.

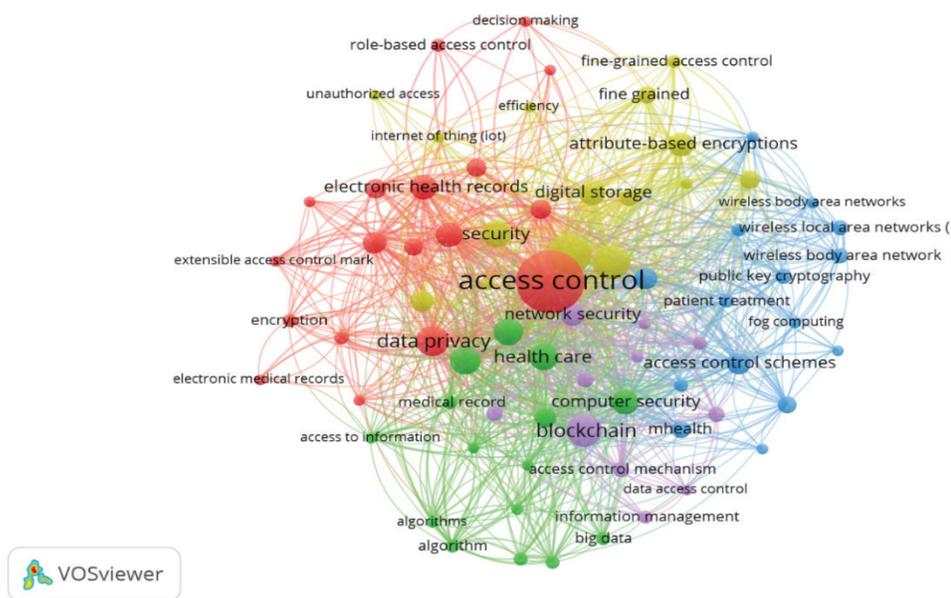


Figura 2. Red bibliométrica de palabras clave.

Resultados

La red bibliométrica incluye las palabras clave más frecuentes encontrados en los artículos incluidos en la investigación. La red de palabras clave se originó de un total de 82 artículos de revisión, encontrados en la base de datos “Scopus”.

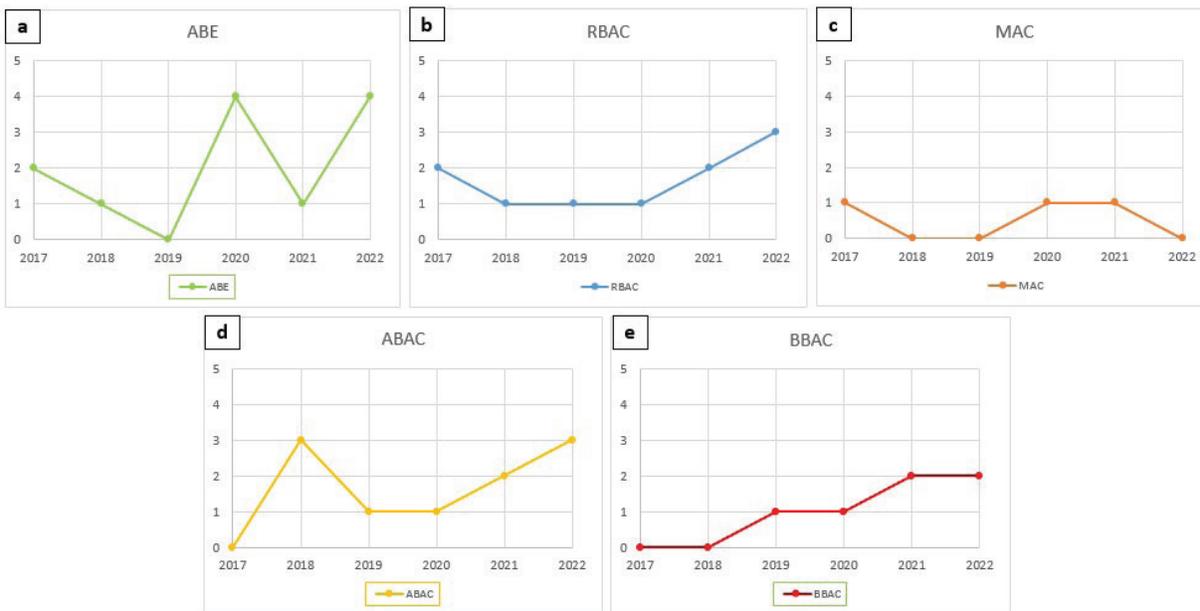


Figura 3. Tendencia de los modelos de control de acceso tradicionales; (a) Cifrado basado en atributos, (b) Control de acceso basado en roles, (c) Control de acceso al medio, (d) Control de acceso basado en atributos y (e) Control de acceso basado en blockcha

Cuadro 1. Problemas encontrados en los modelos de control de acceso tradicionales.

Modelos de control de acceso	Problemas detallados en los estudios	N° referencia
Cifrado basado en atributos (ABE)	•Problema de escalabilidad una vez que aumenta el tamaño de los datos.	[33], [49]
	•Ausencia de mecanismo efectivo para llevar a cabo la revocación del derecho de acceso después de una emergencia.	[33], [41]
	•Requiere muchos recursos de almacenamiento.	[39]
	•Costos computacionales elevados en dispositivos móviles.	[39]
	•Filtraciones de la privacidad del propietario del PHR.	[44, 49]
	•Dificultad para identificar al usuario malicioso que intencionalmente reveló su clave privada (parcial o modificada).	[49]
	•No puede llevar el control del acceso a los flujos de datos de forma independiente.	[57]
	•Las políticas de acceso están en formato de texto no cifrado y revelan información confidencial relacionada con la salud en los registros de salud codificados.	[71]
	•De forma general admite una serie de atributos pequeños, obteniendo una limitante indeseable en los despliegues prácticos debido a que el tamaño de sus parámetros públicos crece linealmente con el tamaño de la serie.	[71]
	•La custodia, la exposición y el abuso de las claves privadas aún dificultan su aplicación práctica en el sistema PHR.	[73]
	•Sobrecarga computacional y demora en la función de cifrado	[78]
Control de acceso basado en atributos (ABAC)	•Carece de una semántica de relación detallada para el acceso a EHR con un mecanismo eficiente de preservación de la privacidad.	[56]
	•Dificulta el tratamiento de primeros auxilios cuando la vida del paciente está en peligro porque el personal de primeros auxilios en el sitio no está autorizado a obtener los datos médicos históricos del paciente.	[58]
	•Requiere un gran número de reglas.	[59]
Control de acceso basado en roles (RBAC)	•Proceso costoso para definir roles.	[59]

Cuadro 2. Modelos de control de acceso mejorados derivados de la solución de los problemas presentes en los modelos mencionados en el cuadro 1.

N°	Modelos de control de acceso mejoradas	Modelos tradicionales		
		Cifrado basado en atributos (ABE)	Control de acceso basado en atributos (ABAC)	Control de acceso basado en roles (RBAC)
1	Control de acceso a datos para equipos de cuidados agudos (AC-AC)	✓		
2	Cifrado de búsqueda basado en atributos basado en contrato inteligente (SC-ABSE)	✓		
3	Búsqueda segura de múltiples palabras clave y control de acceso (SMKS-AC)	✓		
4	Cifrado basado en atributos de política de texto cifrado (CP-ABE) eficiente con capacidad de revocación de atributos (AC-FEH)	✓		
5	Cifrado basado en atributos de políticas de texto cifrado (CP-ABE) de ocultamiento de políticas ligero para el s-health orientada a IoT	✓		
6	Control de acceso rastreable y de ocultación de políticas detallado para Sistemas móviles de salud (HTAC)	✓		
7	Control de acceso basado en la semántica de relaciones con conciencia de privacidad (PRSX-AC)	✓		
8	ShareHealth control de acceso criptográficamente reforzado	✓		
9	Control de accesos de deduplicación		✓	
10	Control de acceso de múltiples capas (MLAC)		✓	✓
11	Control de acceso de grano fino.	✓		
12	Control de acceso a prueba de roturas		✓	
13	CP-ABE con políticas de acceso parcialmente ocultas (PASH)	✓		
14	Control de acceso basado en atributos de política de texto cifrado coordinado con responsabilidad de usuario (CCP-ABAC-UA)	✓		
15	Cifrado basado en atributos de política de texto cifrado CP-ABE basado en grupos modificado (G-CP-ABE)	✓		

Cuadro 3. Modelos de control de acceso recientes implementados una sola vez.

N°	Modelos recientes utilizados solo una vez	N° referencia	Año
1	Marco de privacidad FAIR	[11]	2022
2	Control de acceso basado en token distribuido (DTAC)	[13]	2022
3	Control de acceso seguro y establecimiento de claves para un sistema de salud inteligente sostenible a largo plazo (ACM-SH)	[15]	2022
4	Control de acceso basado en reconocimiento facial	[16]	2022
5	Control de acceso de conclusión de clave (uso de múltiples claves generadas)	[18]	2022
6	Control de acceso dinámico	[19]	2022
7	Control de acceso y función física no clonable (PUF)	[22]	2022
8	Marco de control de acceso e intercambio de EHR	[23]	2022
9	Control de acceso adaptable al riesgo basado en la entropía	[24]	2022
10	Control de acceso de cifrado de signos heterogéneo	[28]	2022
11	Control de acceso de distribución de contenidos eficiente y segura (ES_CD)	[29]	2021
12	Distribución de contenidos eficiente y segura (ES_CD)	[31]	2021
13	Protocolo de límite de distancia (ACIMD)	[42]	2021
14	Niveles de acceso	[48]	2020
15	SoTRAACE (Control de acceso adaptable al riesgo sociotécnico)	[53]	2020
16	Marco de monitoreo remoto seguro y eficiente (SRM)	[55]	2019
17	Control de acceso sensible y enérgico (SE-AC)	[60]	2019
18	Control de acceso de autorización distribuida	[61]	2019
19	Control de Acceso de Emergencia (EACMS)	[62]	2019
20	Control de acceso ligero para dispositivos portátiles	[64]	2019
21	Control de acceso a sensores basado en aprendizaje por refuerzo	[65]	2019
22	Control de acceso que aplica un Analizador de similitud jerárquica (HSA)	[76]	2017
23	Control de acceso GeoXACML	[79]	2017

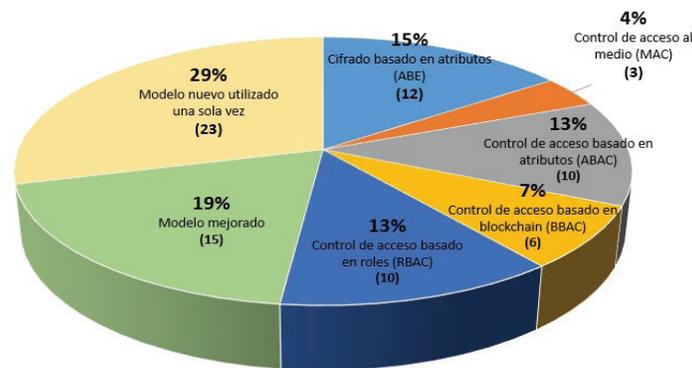


Figura 4. Modelos de control de acceso encontrados.

Los modelos tradicionales en conjunto representan un 52% de todos los estudios encontrados, mientras que los modelos derivados de mejoras un 19% y los nuevos modelos un 29%.

Discusión

Luego de mostrar los resultados, continuamos discutiendo dicha información, se encontró 5 modelos de control de acceso tradicionales, estas son: el modelo de control de acceso basado en atributos (ABAC), basado en roles (RBAC), basado en blockchain (BBAC) y el cifrado basado en atributos (ABE), sin embargo la más utilizada es la última mencionada encontrada en 12 artículos, también se pudo obtener las tendencias de cada modelo de control de acceso entre los años 2017 y 2022 que se visualiza en la figura 3, interpretando que los modelos más antiguos son las de ABE y RBAC que vienen siendo implementados mucho antes del año 2017 mientras que las más actuales como ABAC y BBAC surgieron a partir del 2018, por último podemos observar que actualmente el modelo ABE es implementada en mayor cantidad para la seguridad de datos médicos mientras que BBAC es la menos utilizada.

Dentro de los artículos revisados también se pudo identificar problemas en los modelos tradicionales, mostrando e implementando las soluciones y realizando la comparación para destacar la superioridad frente a los modelos de referencia, dichos problemas los podemos observar en el cuadro 1, dando como resultado que el modelo con mayor cantidad de problemas es la de ABE, sin embargo eso no le impide seguir siendo la más implementada hasta el momento según los resultados que se muestra en la figura 4 obteniendo el mayor porcentaje con un valor de 15%, sin embargo dicho modelo presenta una cantidad de 12 versiones como resultado de mejoras tal como se muestra en el cuadro 2.

También se encontró otra serie de nuevos modelos que se encontraron una única vez, en el cuadro 3 se menciona a cada una de ellas, obteniendo un total de 23 modelos con una tendencia ascendente, siendo el año 2022 el periodo con más modelos nuevos implementados.

Conclusiones

Para realizar la presente investigación se tomó como punto de inicio el problema sobre el acceso no autorizado a los datos sensibles que se registra en las organizaciones dedicadas al servicio de salud, lo cual dio pie al desarrollo sobre el tema de los modelos de control de acceso que se vienen utilizando en ese tipo de organizaciones.

Partiendo de toda la información hallada, pudimos conocer los modelos tradicionales de mayor uso siendo un total de 5 las cuales son: ABE, ABAC, RBAC, BBAC y MAC; además, se identificó 15 modelos que surgieron de mejorar los tradicionales y por último se identificó 23 modelos nuevos que se implementaron una sola vez; por lo tanto, se obtuvo un total de 42 variaciones de modelos de control de acceso.

También se logró identificar los problemas que padecen algunos de los esquema tradicionales de control de acceso, por lo cual el esquema de ABE resultó ser el menos efectivo por los diversos inconvenientes presentes, sin embargo, los resultados mostraron que fue el más utilizado, además no se encontró un único esquema que abarque la solución completa de todos esos problemas, por lo cual es necesario recurrir a una combinación que cubra al menos gran parte de los problemas presentes.

La investigación realizada puede contribuir al conocimiento de las organizaciones sobre qué modelos o esquemas existentes se pueden implementar, para preservar la seguridad de los datos médicos o investigar más a fondo sobre alguno de su interés.

Recomendaciones

Para próximas investigaciones, se recomienda realizar un minucioso proceso de identificación de modelos y enfocarse en las características más notables así como las limitaciones que presentan, aportará mucha valor conocer qué tan efectivas pueden ser para futuras implementaciones.

Referencias

- [1] S. K. Rana *et al.*, «Blockchain Technology and Artificial Intelligence Based Decentralized Access Control Model to Enable Secure Interoperability for Healthcare», *Sustainability*, vol. 14, n.º 15, Art. n.º 15, ene. 2022, doi: 10.3390/su14159471.
- [2] K. Srivastava y N. Shekokar, «Design of machine learning and rule based access control system with respect to adaptability and genuineness of the requester», *EAI Endorsed Trans. Pervasive Health Technol.*, vol. 6, n.º 24, pp. 1-12, 2020, doi: 10.4108/eai.24-9-2020.166359.
- [3] A. K. Malik *et al.*, «From conventional to state-of-the-art iot access control models», *Electron. Switz.*, vol. 9, n.º 10, pp. 1-34, 2020, doi: 10.3390/electronics9101693.
- [4] E. Psarra, D. Apostolou, Y. Verginadis, I. Patiniotakis, y G. Mentzas, «Context-Based, Predictive Access Control to Electronic Health Records», *Electronics*, vol. 11, n.º 19, Art. n.º 19, ene. 2022, doi: 10.3390/electronics11193040.
- [5] X. Zhou, J. Liu, Q. Wu, y Z. Zhang, «Privacy Preservation for Outsourced Medical Data with Flexible Access Control», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 14827-14841, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2810243.
- [6] A. Bouani, Y. B. Maissa, R. Saadane, A. Hammouch, y A. Tamtaoui, «A Comprehensive Survey of Medium Access Control Protocols for Wireless Body Area Networks», *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/5561580.
- [7] Y. Zia, F. Bashir, y K. N. Qureshi, «Dynamic superframe adaptation using group-based media access control for handling traffic heterogeneity in wireless body area networks», *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 16, n.º 8, 2020, doi: 10.1177/1550147720949140.
- [8] S. K. Memon, N. I. Sarkar, y A. Al-Anbuky, «Multiple preemptive EDCA for emergency medium access control in distributed WLANs», *Wirel. Netw.*, vol. 23, n.º 5, pp. 1523-1534, 2017, doi: 10.1007/s11276-016-1236-9.
- [9] G. Kang y Y.-G. Kim, «Secure Collaborative Platform for Health Care Research in an Open Environment: Perspective on Accountability in Access Control», *J. Med. Internet Res.*, vol. 24, n.º 10, p. e37978, oct. 2022, doi: 10.2196/37978.
- [10] S. Salonikias, M. Khair, T. Mastoras, y I. Mavridis, «Blockchain-Based Access Control in a Globalized Healthcare Provisioning Ecosystem», *Electronics*, vol. 11, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2022, doi: 10.3390/electronics11172652.
- [11] P. H. P. Jati *et al.*, «Data Access, Control, and Privacy Protection in the VODAN-Africa Architecture», *Data Intell.*, pp. 1-29, ago. 2022, doi: 10.1162/dint_a_00180.
- [12] M. Fareed y A. A. Yassin, «Privacy-preserving multi-factor authentication and role-based access control scheme for the E-healthcare system», *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 11, n.º 4, Art. n.º 4, ago. 2022, doi: 10.11591/eei.v11i4.3658.
- [13] J. R. Amalraj y R. Lourdusamy, «A Novel Distributed Token-Based Access Control Algorithm Using A Secret Sharing Scheme for Secure Data Access Control», *Int. J. Comput. Netw. Appl.*, vol. 9, n.º 4, p. 374, ago. 2022, doi: 10.22247/ijcna/2022/214501.
- [14] L. Zhang *et al.*, «BDSS: Blockchain-based Data Sharing Scheme With Fine-grained Access Control And Permission Revocation In Medical Environment», *KSI Trans. Internet Inf. Syst. TIIS*, vol. 16, n.º 5, pp. 1634-1652, 2022, doi: 10.3837/tiis.2022.05.012.
- [15] S. Thapliyal *et al.*, «ACM-SH: An Efficient Access Control and Key Establishment Mechanism for Sustainable Smart Healthcare», *Sustainability*, vol. 14, n.º 8, Art. n.º 8, ene. 2022, doi: 10.3390/su14084661.
- [16] Q. Wang, L. Hou, J.-C. Hong, X. Yang, y M. Zhang, «Impact of Face-Recognition-Based Access Control System on College Students' Sense of School Identity and Belonging During COVID-19 Pandemic», *Front. Psychol.*, vol. 13, 2022, Accedido: 8 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.808189>

- [17] H. Saidi, N. Labraoui, A. A. A. Ari, L. A. Maglaras, y J. H. M. Emati, «DSMAC: Privacy-Aware Decentralized Self-Management of Data Access Control Based on Blockchain for Health Data», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 101011-101028, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207803.
- [18] K. Zala *et al.*, «On the Design of Secured and Reliable Dynamic Access Control Scheme of Patient E-Healthcare Records in Cloud Environment», *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2022, p. e3804553, ago. 2022, doi: 10.1155/2022/3804553.
- [19] T.-W. Chiang *et al.*, «Novel Lagrange interpolation polynomials for dynamic access control in a healthcare cloud system», *Math. Biosci. Eng.*, vol. 19, n.º 9, Art. n.º mbe-19-09-427, 2022, doi: 10.3934/mbe.2022427.
- [20] K. Thilagam *et al.*, «Secure IoT Healthcare Architecture with Deep Learning-Based Access Control System», *J. Nanomater.*, vol. 2022, p. e2638613, may 2022, doi: 10.1155/2022/2638613.
- [21] X. Li, «A Blockchain-Based Verifiable User Data Access Control Policy for Secured Cloud Data Storage», *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2022, p. e2254411, abr. 2022, doi: 10.1155/2022/2254411.
- [22] S. Shi, M. Luo, Y. Wen, L. Wang, y D. He, «A Blockchain-Based User Authentication Scheme with Access Control for Telehealth Systems», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2022, p. e6735003, mar. 2022, doi: 10.1155/2022/6735003.
- [23] I. Boumezbeur y K. Zarour, «Privacy Preservation and Access Control for Sharing Electronic Health Records Using Blockchain Technology», *Acta Inform. Pragensia*, vol. 11, n.º 1, pp. 105-122, mar. 2022, doi: 10.18267/j.aip.176.
- [24] R. Jiang, S. Han, M. Shi, T. Gao, y X. Zhao, «Healthcare Big Data Privacy Protection Model Based on Risk-Adaptive Access Control», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2022, p. e3086516, mar. 2022, doi: 10.1155/2022/3086516.
- [25] S. Xu, Y. Li, R. H. Deng, Y. Zhang, X. Luo, y X. Liu, «Lightweight and Expressive Fine-Grained Access Control for Healthcare Internet-of-Things», *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 10, n.º 1, pp. 474-490, ene. 2022, doi: 10.1109/TCC.2019.2936481.
- [26] K. C. y Dr. R. S., «Top-Down Approach in Access Control with Timing Enabled Key Distribution for Hierarchical Systems in Electronic Health Records», *Indian J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 13, n.º 1, pp. 34-39, feb. 2022, doi: 10.21817/indjce/2022/v13i1/221301033.
- [27] S. Khan *et al.*, «An Efficient and Secure Revocation-Enabled Attribute-Based Access Control for eHealth in Smart Society», *Sensors*, vol. 22, n.º 1, 2022, doi: 10.3390/s22010336.
- [28] I. Ullah, H. Zahid, F. Algarni, y M. A. Khan, «An access control scheme using heterogeneous signcryption for IoT environments», *Comput. Mater. Contin.*, vol. 70, n.º 3, pp. 4307-4321, 2022, doi: 10.32604/cmc.2022.017380.
- [29] Z. Szabó y V. Bilicki, «Evaluation of EHR Access Control in a Heterogenous Test Environment», *Acta Cybern.*, vol. 25, n.º 2, pp. 485-516, 2021, doi: 10.14232/ACTACYB.290283.
- [30] A. Iftekhhar, X. Cui, Q. Tao, y C. Zheng, «Hyperledger fabric access control system for internet of things layer in blockchain-based applications», *Entropy*, vol. 23, n.º 8, 2021, doi: 10.3390/e23081054.
- [31] H. H. Hlaing, Y. Funamoto, y M. Mambo, «Secure content distribution with access control enforcement in named data networking», *Sensors*, vol. 21, n.º 13, 2021, doi: 10.3390/s21134477.
- [32] F. Khan, S. Khan, S. Tahir, J. Ahmad, H. Tahir, y S. A. Shah, «Granular data access control with a patient-centric policy update for healthcare», *Sensors*, vol. 21, n.º 10, 2021, doi: 10.3390/s21103556.
- [33] M. T. de Oliveira, H.-V. Dang, L. H. A. Reis, H. A. Marquering, y S. D. Olabariaga, «AC-AC: Dynamic revocable access control for acute care teams to access medical records», *Smart Health*, vol. 20, 2021, doi: 10.1016/j.smhl.2021.100190.
- [34] H. M. Hussien, S. M. Yasin, N. I. Udzir, y M. I. H. Ninggal, «Blockchain-based access control scheme for secure shared personal health records over decentralised storage», *Sensors*, vol. 21, n.º 7, 2021, doi: 10.3390/s21072462.
- [35] P. Meier, J. H. Beinke, C. Fitte, J. Schulte to Brinke, y F. Teuteberg, «Generating design knowledge for blockchain-based access control to personal health records», *Inf. Syst. E-Bus. Manag.*, vol. 19, n.º 1, pp. 13-41, 2021, doi: 10.1007/s10257-020-00476-2.
- [36] M. Antonio de Carvalho Junior y P. Bandiera-Paiva, «Implications of loosened Role-based Access Control session control implementation for the enforcement of Dynamic Mutually Exclusive Roles properties on Health Information Systems», *Inform. Med. Unlocked*, vol. 27, 2021, doi: 10.1016/j.imu.2021.100780.
- [37] F. Chen *et al.*, «Data Access Control Based on Blockchain in Medical Cyber Physical Systems», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/3395537.

- [38] S.-C. Haw, O. Tahir Yinka, T. T. V. Yap, y S. Subramaniam, «Improving the data access control using blockchain for healthcare domain», *F1000Research*, vol. 10, 2021, doi: 10.12688/f1000research.72890.2.
- [39] Y. Ding, H. Xu, Y. Wang, F. Yuan, y H. Liang, «Secure Multi-Keyword Search and Access Control over Electronic Health Records in Wireless Body Area Networks», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9520941.
- [40] Y. Chen, L. Meng, H. Zhou, y G. Xue, «A Blockchain-Based Medical Data Sharing Mechanism with Attribute-Based Access Control and Privacy Protection», *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6685762.
- [41] J. Zhao, P. Zeng, y K.-K. R. Choo, «An Efficient Access Control Scheme with Outsourcing and Attribute Revocation for Fog-Enabled E-Health», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 13789-13799, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3052247.
- [42] C. Camara, P. Peris-Lopez, J. M. De Fuentes, y S. Marchal, «Access Control for Implantable Medical Devices», *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 9, n.º 3, pp. 1126-1138, 2021, doi: 10.1109/TETC.2020.2982461.
- [43] J. Sun, L. Ren, S. Wang, y X. Yao, «A blockchain-based framework for electronic medical records sharing with fine-grained access control», *PLoS ONE*, vol. 15, n.º 10 October, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0239946.
- [44] J. Sun, H. Xiong, X. Liu, Y. Zhang, X. Nie, y R. H. Deng, «Lightweight and Privacy-Aware Fine-Grained Access Control for IoT-Oriented Smart Health», *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, n.º 7, pp. 6566-6575, 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2974257.
- [45] T. T. Thwin y S. Vasupongayya, «Performance analysis of blockchain-based access control model for personal health record system with architectural modelling and simulation», *Int. J. Networked Distrib. Comput.*, vol. 8, n.º 3, pp. 139-151, 2020, doi: 10.2991/ijndc.k.200515.002.
- [46] M. Ali, M.-R. Sadeghi, y X. Liu, «Lightweight fine-grained access control for wireless body area networks», *Sens. Switz.*, vol. 20, n.º 4, 2020, doi: 10.3390/s20041088.
- [47] S. R. Vulapula y S. Malladi, «Attribute-Based Encryption for Fine-Grained Access Control on Secure Hybrid Clouds», *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 11, n.º 10, pp. 380-387, 2020, doi: 10.14569/IJACSA.2020.0111047.
- [48] M. Guclu, C. Bakir, y V. Hakkoymaz, «A New Scalable and Expandable Access Control Model for Distributed Database Systems in Data Security», *Sci. Program.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8875069.
- [49] Q. Li, Y. Zhang, T. Zhang, H. Huang, Y. He, y J. Xiong, «HTAC: Fine-Grained Policy-Hiding and Traceable Access Control in mHealth», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123430-123439, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3004897.
- [50] L. O. Nweke, P. Yeng, S. D. Wolthusen, y B. Yang, «Understanding attribute-based access control for modelling and analysing healthcare professionals' security practices», *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, n.º 2, pp. 683-690, 2020, doi: 10.14569/ijacsa.2020.0110286.
- [51] X. Zhou, J. Liu, Z. Zhang, y Q. Wu, «Secure Outsourced Medical Data against Unexpected Leakage with Flexible Access Control in a Cloud Storage System», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8347213.
- [52] K. Edemacu, B. Jang, y J. W. Kim, «Efficient and Expressive Access Control with Revocation for Privacy of PHR Based on OBDD Access Structure», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 18546-18557, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968078.
- [53] P. Moura, P. Fazendeiro, P. R. M. Inácio, P. Vieira-Marques, y A. Ferreira, «Assessing Access Control Risk for mHealth: A Delphi Study to Categorize Security of Health Data and Provide Risk Assessment for Mobile Apps», *J. Healthc. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/5601068.
- [54] Y. Zhang *et al.*, «Research on electronic medical record access control based on blockchain», *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 15, n.º 11, 2019, doi: 10.1177/1550147719889330.
- [55] Y. Chen, W. Sun, N. Zhang, Q. Zheng, W. Lou, y Y. T. Hou, «Towards Efficient Fine-Grained Access Control and Trustworthy Data Processing for Remote Monitoring Services in IoT», *IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.*, vol. 14, n.º 7, pp. 1830-1842, 2019, doi: 10.1109/TIFS.2018.2885287.
- [56] T. Kanwal *et al.*, «Privacy-aware relationship semantics-based XACML access control model for electronic health records in hybrid cloud», *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, vol. 15, n.º 6, 2019, doi: 10.1177/1550147719846050.
- [57] E. Greene, P. Proctor, y D. Kotz, «Secure sharing of mHealth data streams through cryptographically-enforced access control», *Smart Health*, vol. 12, pp. 49-65, 2019, doi: 10.1016/j.smhl.2018.01.003.
- [58] Y. Yang, X. Zheng, W. Guo, X. Liu, y V. Chang, «Privacy-preserving smart IoT-based healthcare big data storage and self-adaptive access control system», *Inf. Sci.*, vol. 479, pp. 567-592, 2019, doi: 10.1016/j.ins.2018.02.005.

- [59] S. Chenthara, K. Ahmed, y F. Whittaker, «Privacy-Preserving Data Sharing Using Multi-Layer Access Control Model in Electronic Health Environment», *EAI Endorsed Trans. Scalable Inf. Syst.*, vol. 6, n.º 22, pp. 1-12, 2019, doi: 10.4108/eai.13-7-2018.159356.
- [60] K. Riad, R. Hamza, y H. Yan, «Sensitive and Energetic IoT Access Control for Managing Cloud Electronic Health Records», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 86384-86393, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2926354.
- [61] Q. Wang, H. Wang, Y. Wang, y R. Guo, «A Distributed Access Control with Outsourced Computation in Fog Computing», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/6782753.
- [62] A. R. Rajput, Q. Li, M. Taleby Ahvanooey, y I. Masood, «EACMS: Emergency Access Control Management System for Personal Health Record Based on Blockchain», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 84304-84317, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917976.
- [63] T. T. Thwin y S. Vasupongayya, «Blockchain-Based Access Control Model to Preserve Privacy for Personal Health Record Systems», *Secur. Commun. Netw.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/8315614.
- [64] F. P. Díez, D. S. Touceda, J. M. S. Cámara, y S. Zeadally, «Lightweight Access Control System for Wearable Devices», *IT Prof.*, vol. 21, n.º 1, pp. 50-58, 2019, doi: 10.1109/MITP.2018.2876985.
- [65] G. Chen, Y. Zhan, G. Sheng, L. Xiao, y Y. Wang, «Reinforcement Learning-Based Sensor Access Control for WBANs», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8483-8494, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2889879.
- [66] A. Margheri, M. Masi, R. Pugliese, y F. Tiezzi, «A Rigorous Framework for Specification, Analysis and Enforcement of Access Control Policies», *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 45, n.º 1, pp. 2-33, 2019, doi: 10.1109/TSE.2017.2765640.
- [67] Y. Zhang, R. H. Deng, G. Han, y D. Zheng, «Secure smart health with privacy-aware aggregate authentication and access control in Internet of Things», *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 123, pp. 89-100, 2018, doi: 10.1016/j.jnca.2018.09.005.
- [68] J. Sun, X. Wang, S. Wang, y L. Ren, «A searchable personal health records framework with fine-grained access control in cloud-fog computing», *PLoS ONE*, vol. 13, n.º 11, 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0207543.
- [69] Y. Ming y T. Zhang, «Efficient privacy-preserving access control scheme in electronic health records system», *Sens. Switz.*, vol. 18, n.º 10, 2018, doi: 10.3390/s18103520.
- [70] Y. Yang, X. Liu, y R. H. Deng, «Lightweight break-glass access control system for healthcare internet-of-things», *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 14, n.º 8, pp. 3610-3617, 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2751640.
- [71] Y. Zhang, D. Zheng, y R. H. Deng, «Security and Privacy in Smart Health: Efficient Policy-Hiding Attribute-Based Access Control», *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, n.º 3, pp. 2130-2145, 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2825289.
- [72] U. Salama, L. Yao, y H.-Y. Paik, «An internet of things based multi-level privacy-preserving access control for smart living», *Informatics*, vol. 5, n.º 2, 2018, doi: 10.3390/informatics5020023.
- [73] G. Lin, L. You, B. Hu, H. Hong, y Z. Sun, «A coordinated ciphertext policy attribute-based PHR access control with user accountability», *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 12, n.º 4, pp. 1832-1853, 2018, doi: 10.3837/tis.2018.04.024.
- [74] A. Small y D. Wainwright, «Privacy and security of electronic patient records – Tailoring multimethodology to explore the socio-political problems associated with Role Based Access Control systems», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 265, n.º 1, pp. 344-360, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.07.041.
- [75] K. Seol, Y.-G. Kim, E. Lee, Y.-D. Seo, y D.-K. Baik, «Privacy-preserving attribute-based access control model for XML-based electronic health record system», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9114-9128, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2800288.
- [76] S. Bhartiya, D. Mehrotra, y A. Girdhar, «Proposing hierarchy-similarity based access control framework: A multilevel Electronic Health Record data sharing approach for interoperable environment», *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 29, n.º 4, pp. 505-519, 2017, doi: 10.1016/j.jksuci.2015.08.005.
- [77] M. Abomhara, H. Yang, G. M. Køien, y M. B. Lazreg, «Work-Based Access Control Model for Cooperative Healthcare Environments: Formal Specification and Verification», *J. Healthc. Inform. Res.*, vol. 1, n.º 1, pp. 19-51, 2017, doi: 10.1007/s41666-017-0004-7.
- [78] S. M. Bhaskaran y R. Sridhar, «Hybrid solution for privacy-preserving access control for healthcare data», *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 17, n.º 2, pp. 31-38, 2017, doi: 10.4316/AECE.2017.02005.
- [79] S. Arunkumar, B. Soyluoglu, M. Sensoy, M. Srivatsa, y M. Rajarajan, «Location attestation and access control for mobile devices using GeoXACML», *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 80, pp. 181-188, 2017, doi: 10.1016/j.jnca.2016.11.028.
- [80] P. G. Shynu y K. J. Singh, «An enhanced ABE based secure access control scheme for E-health clouds», *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 10, n.º 5, pp. 29-37, 2017, doi: 10.22266/ijies2017.1031.04.

- [81] S. Chatterjee *et al.*, «On the Design of Fine Grained Access Control with User Authentication Scheme for Telecare Medicine Information Systems», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7012-7030, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2694044.
- [82] Z. Qin, J. Sun, D. Chen, y H. Xiong, «Flexible and Lightweight Access Control for Online Healthcare Social Networks in the Context of the Internet of Things», *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/7514867.

La mora tropical de altura (*Rubus adenotrichos* Schlttdl.) como potencial alimento funcional: una mirada a las investigaciones realizadas

The tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichos* Schlttdl.) as a potential functional food: a look at the research carried out

Alexander Schmidt-Durán¹, Mario Rodríguez-Monroy², Oscar Acosta-Montoya³

Fecha de recepción: 9 de febrero, 2023

Fecha de aprobación: 18 de junio, 2023

Schmidt-Durán, A; Rodríguez-Monroy, M; Acosta-Montoya, O. La mora tropical de altura (*Rubus adenotrichos* schlttdl.) Como potencial alimento funcional: una mirada a las investigaciones realizadas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 128-148.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6654>

- 1 Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Centro de Investigación en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: aschmidt@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-1061-6840>
- 2 Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional, Morelos, México. Correo electrónico: mrmonroy@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0001-6201-7594>
- 3 Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: oscar.acosta@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-8156-6556>

Palabras clave

Rubus adenotrichos; mora; polifenoles; antioxidantes; capacidad de absorción de radicales de oxígeno.

Resumen

La mora (*Rubus adenotrichos* Schltdl.) ha sido catalogada como una de las frutas con alto potencial como alimento funcional, especialmente por su concentración de elagitaninos y antocianinas. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue hacer una revisión narrativa con los artículos científicos realizados con esta especie, desde los trabajos agronómicos y de cultivos de tejidos, los análisis de los compuestos en la fruta y en el procesamiento del jugo, el potencial benéfico para la salud de esta fruta en pruebas realizadas tanto *in vitro* como *in vivo* así como la posibilidad que las herramientas biotecnológicas permiten para escalar la producción de estos compuestos, compilando en las mismas unidades de medición, la concentración de los principales compuestos bioactivos de la mora.

Keywords

Rubus adenotrichos; blackberry; polyphenols; antioxidants; oxygen radical absorbance capacity.

Abstract

Blackberry (*Rubus adenotrichos* Schltdl.) has been classified as a fruit with high potential as a functional food, due to its high concentration of ellagitannins and anthocyanins. Therefore, the aim of this study is to compile the research articles performed with these species, from agronomical to tissue culture studies, to analysis of fruit compounds and fruit juice processing; and the potential health benefits from this fruit in studies performed *in vitro* and *in vivo*, as well as the possibility of using biotechnological tools for bioprocessing and upscaling the production of compounds of interest, compiling, in the same units of measure, the concentration of the main bioactive blackberry compounds.

Introducción

Las moras pertenecen al género *Rubus*, se caracterizan por tener un crecimiento arbustivo de tipo erecto, semierecto o rastrero [1] [2]. La planta se reproduce principalmente de forma asexual por medio de acodos y presenta en su ciclo de cultivo tres etapas: vegetativa, reproductiva y de producción [1]. Los tallos de la planta de mora generalmente poseen espinas y tienen un sistema radical fibroso, los cuales crecen en forma de macolla [2]. Las hojas tienen bordes dentados y presentan de tres a cinco folíolos [1] [2]. Presenta frutas agregadas que pueden ser de color rojas o moradas oscuras, formadas por drupas carnosas de forma redonda o elipsoidal, las cuales contienen a las semillas [1] [3]. Las flores son hermafroditas y actinomorfas, contienen varios estambres y pistilos, crecen en inflorescencias terminales o axiales, de color blanco, rosado o morado. Las flores tienen cinco pétalos y cinco sépalos y su polinización se realiza por insectos, especialmente abejas (*Apis mellifera* L.) [1] [2].

Las frutas de la mora se consumen de manera fresca o procesada, a través de la producción de productos congelados, enlatados, pulpas, jugos y frutas liofilizadas [3]. La producción de mora a nivel mundial se ha expandido drásticamente, siendo Estados Unidos el mayor productor mundial, mientras que, en Europa, Serbia es el principal país que lo cultiva. En latinoamericana se cultiva principalmente en México y América Central, donde sobresalen Costa Rica y

Guatemala, y en menor medida se encuentran Ecuador y Chile. En Asia, China es su principal productor, mientras que Nueva Zelanda destaca en Oceanía y en África solo se tiene reportes de producción por parte de Sudáfrica [3] [4] [5].

Las investigaciones en *Rubus* han aumentado significativamente en los últimos años, ya que además de su valor nutricional, presenta una alta capacidad antioxidante debido a su contenido de polifenoles, los cuales presentan un potencial beneficio a la salud, como se detalla en la revisión de Lee et al. [6]. *Rubus adenotrichos* es una especie de mora que crece en un clima tropical de altura y ha sido estudiada desde hace más de 30 años, aunque más intensamente en los últimos 15 años por sus compuestos de interés, especialmente elagitaninos y antocianinas. Es por esta razón, que el objetivo de este trabajo fue compilar, hasta nuestro saber, los trabajos realizados en *R. adenotrichos* (mencionada en algunos artículos como *R. adenotrichus*), detallando la concentración de polifenoles totales, elagitaninos, antocianinas y capacidad antioxidante obtenidos en las investigaciones. Para esto, se realizó una revisión de literatura de tipo narrativa, consultando las bases de datos Web of Science, Scopus, Springer, SciELO, Google Scholar, DOAJ, así como libros impresos. Se encontraron tres libros impresos y 39 artículos científicos, de los cuales, debido a su objeto de estudio, se descartaron las publicaciones realizadas por González y Perez [7], Rodríguez-Díaz et al. [8] y Segura et al. [9] para este artículo.

Investigaciones en *Rubus adenotrichos*

Primeras investigaciones

Desde mediados de los años 90, se han realizado investigaciones en Costa Rica relacionadas con el cultivo de la mora (*Rubus* spp), especialmente con *Rubus adenotrichos* variedad Vino espina roja, según su denominación local, debido a su interés comercial y potencial uso medicinal y alimenticio que posee [1] [2]. Inicialmente los trabajos se centraron en la caracterización fenotípica, diseños de siembra, distancias de siembra, fertilización, podas, problemas fitosanitarios [1] [2], conservación de germoplasma, micropropagación, elaboración de productos agroindustriales [10], enraizamiento [10] [11] [12] y aclimatación de plantas [10] [11].

En las investigaciones agronómicas, Orozco et al. [13] evaluaron el efecto del sistema de propagación en el rendimiento de la cosecha de la mora en las variedades Vino espina roja y Vino sin espinas. Para esto, utilizaron un sistema de propagación vegetativa, a través de una reproducción asexual por acodos aéreos y un sistema de micropropagación, a través de plántulas obtenidas *in vitro* y aclimatadas en invernadero antes de ser sembradas en campo. Los investigadores evidenciaron que los rendimientos de la variedad Vino espina roja son de tres a cuatro veces superiores a los obtenidos por la variedad Vino sin espinas. Además, en el primer año de evaluación, las plantas propagadas por acodos obtuvieron cosecha, mientras que las micropropagadas no. Sin embargo, a partir del segundo año de evaluación, los rendimientos de ambos tipos de reproducción fueron similares para ambas variedades. Las plantas *in vitro* generalmente requieren de un mayor tiempo para adaptarse en campo, sin embargo, tomando en cuenta que son plantas élite libre de enfermedades, es una alternativa viable de implementar para el agricultor.

También, Orozco y Muñoz [14] determinaron el efecto del compost y lombricompost sobre el suelo y los rendimientos de la mora, logrando determinar que los abonos orgánicos mejoraron especialmente el contenido de micronutrientes y el pH del suelo en las fincas evaluadas, lo cual condujo a obtener un mayor rendimiento de cosecha. Además, se logró determinar que los abonos utilizados no afectaron las cadenas tróficas, ni los microorganismos presentes en el

suelo [15]. Los abonos orgánicos, además de su aporte de nutrientes y de mejorar la estructura del suelo, aportan microorganismos benéficos a la rizosfera, siendo esperable un aumento en las poblaciones microbianas. Sin embargo, este efecto no fue posible visualizarlo en esa investigación.

Por otro lado, Flores et al. [11] reportaron para la multiplicación de la planta de mora, un método de enraizamiento en sistemas de inmersión temporal y de aclimatación de las plántulas en invernadero. La implementación de dicha metodología logró reducir en un 50% el tiempo de la etapa de enraizamiento comparado a estudios previos y permitió alcanzar más de un 75% de supervivencia de las plantas durante su aclimatación en invernadero. Flores et al. [12], trabajando con la misma línea celular de mora, también probaron el efecto de nanotubos de carbono como promotores del crecimiento de la planta y su efecto en el enraizamiento. Sus resultados demostraron que los nanotubos de carbono de pared simple funcionalizados con un grupo carboxilo, aumentaron el tamaño de las plantas, promovieron una mayor cantidad de raíces en un menor tiempo, y presentaron una mayor diferenciación celular en los tejidos de crecimiento, evidenciando que los nanotubos de carbono pueden ser usados como promotores del crecimiento vegetal para la mora.

El uso de nanotubos de carbono en las investigaciones, especialmente con cultivos de consumo humano, genera controversia, ya que hay reportes de los efectos adversos para la salud [16]. La investigación realizada por [12] se limita a su uso bajo condiciones de laboratorio, por lo que se requiere de futuras investigaciones que permitan clarificar si éstos pueden ser encontrados en la fruta, si son retenidos por la planta en algún tejido u órgano, o son desechados bajo algún mecanismo, con el fin de ver si el uso de los nanotubos de carbono puede ser una estrategia viable para usarse en la micropropagación de las plantas de mora para consumo humano.

A pesar de que las primeras investigaciones tuvieron un énfasis más agronómico y de producción *in vitro*, los trabajos de Mertz et al. [17] y Acosta-Montoya et al. [18], los cuales reportaron el contenido de polifenoles totales, elagitaninos y antocianinas presentes en la fruta, provocaron un cambio en la perspectiva de los trabajos realizados para esta planta.

Compuestos polifenólicos de la fruta

Como se mencionó, la mora ha sido catalogada como una fruta rica en polifenoles con capacidad antioxidante, los cuales tienen posibles efectos benéficos para la salud humana [6]. Por esta razón, el trabajo de Mertz et al. [17] fue el primero que reportó el contenido de metabolitos secundarios para la mora tropical de altura. Los autores realizaron un estudio en frutas maduras de dos especies de mora (*Rubus glaucus* y *Rubus adenotrichos*), cuantificando la concentración de diferentes compuestos de interés: taninos hidrolizables, antocianinas, ácidos hidroxycinámicos y flavonoides (cuadro 1). Los autores realizaron la extracción de 2 g de la fruta liofilizada con 60 ml de una solución de acetona (70% v/v) como solvente extractor con 2% de ácido fórmico. El análisis fue realizado mediante cromatografía líquida de alta eficiencia con detección mediante arreglo de diodos (HPLC-DAD) y espectrofotometría de masas con trampa de iones por electropulverización (ES/MS IT), en donde se determinó que *R. adenotrichos* presenta valores de flavonoides, la antocianina cianidina-3-glucósido y el elagitanino Lambertianin C en mayor proporción que *R. glaucus*.

La metodología descrita por [17] fue la base para la extracción y cuantificación de antocianinas y elagitaninos realizadas en otras investigaciones [18] [19] [20] [21] [22] [23]. Sin embargo, no hubo un estudio sistemático para la estandarización de las condiciones de extracción y solventes a utilizar, que permita determinar estadísticamente las condiciones de extracción más adecuadas para la obtención de los biocompuestos. Múltiples factores intervienen en la recuperación de los compuestos bioactivos, tales como el solvente a utilizar, la fuente del

material a extraer y la metodología de extracción [24] [25] [26]. Por ejemplo, el agua, el etanol y sus mezclas, son los solventes extractores más utilizados por su baja toxicidad; mientras que el metanol es donde se ha obtenido la mayor recuperación de taninos [27]. Por lo que resulta particular que, el método de extracción utilizado por muchos de los artículos en esta especie, no haya contemplado una optimización de estas condiciones y se limitaran a utilizar la misma metodología de [17].

Mertz et al. [19], determinaron el contenido de polifenoles totales, carotenoides y capacidad antioxidante de dos variedades de tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.), naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.) y mora (*R. adenotrichos* y *R. glaucus*) mediante pruebas espectrofotométricas (Folin-Ciocalteu y ORAC) y HPLC-DAD-MS. Se logró determinar que el contenido de polifenoles totales, así como la concentración de elagitaninos y antocianinas fue mayor en la mora, que en las dos variedades de tomate de árbol evaluadas. Los autores probaron diferentes solventes para evaluar la capacidad antioxidante, determinando que la acetona presentaba los valores más altos (cuadro 1). Sin embargo, los autores no evaluaron otros solventes más polares como el etanol o el metanol.

Debido al potencial que se observaba en la mora, Acosta-Montoya et al. [18] investigaron el efecto del estado de madurez en el contenido polifenólico y en su capacidad antioxidante. Los autores concluyeron que, al aumentar el estado de madurez (grado 3), aumenta la cantidad de azúcares, sólidos solubles y antocianinas en la fruta, pero disminuye la concentración de elagitaninos, flavonoides y derivados del ácido elálgico. Sin embargo, en su estado más inmaduro (grado 1), la mora contiene una alta concentración de elagitaninos, como se observa en el cuadro 1. Los investigadores concluyeron que *R. adenotrichos* presenta una de las mayores cantidades de elagitaninos reportados para cualquier fruta comestible, por lo que podía tener un alto potencial comercial como alimento funcional. Sin embargo, las concentraciones más altas se encontraron en valores de fruta inmadura, la cual usualmente no es consumible.

Martínez-Cruz et al. [28] determinaron el contenido de compuestos potencialmente bioactivos en *R. adenotrichos* silvestres procedentes de Veracruz, México, reportando que la mora silvestre contiene 1,7 veces más cianidina-3-glucósido y una menor concentración de polifenoles totales que lo obtenido en moras cultivadas de Costa Rica y reportado por [17]. Los autores sugieren que las moras silvestres también deben ser consideradas como alimento funcional. Es importante señalar que [28] utilizaron una metodología de extracción y de cuantificación mediante HPLC distinta a la establecida por [17], lo que limita la comparación directa de los resultados con los reportados en otras investigaciones previas.

Después de los análisis directos a la fruta de mora, las investigaciones se centraron en determinar la concentración de los compuestos polifenólicos en diferentes variedades de *R. adenotrichos*, para determinar cuál poseía un mayor potencial económico. Los trabajos previos realizados habían utilizado la variedad Vino espina roja, una de las variedades comerciales utilizadas en Costa Rica. Primeramente, Araya et al. [24] evaluó las variedades Dulce, Vino espina roja y Vino sin espinas, bajo tres diferentes estados de madurez, las cuales para esta revisión se catalogaron en grado 1, 2 y 3, para la comparación con los resultados obtenidos por [18]. Los autores evaluaron diferentes solventes de extracción, así como la cantidad de extracciones necesaria para obtener la mayor cantidad de polifenoles en las muestras. La investigación determinó que realizando cuatro extracciones con etanol al 95%, fue el método de extracción adecuado para obtener la mayor cantidad de polifenoles totales y concluyen que, sin importar la variedad evaluada, las frutas inmaduras presentaban valores más altos de polifenoles totales, capacidad antioxidante y proantocianidinas; mientras que, al aumentar el grado de madurez, aumenta la concentración de antocianinas, resultados similares a lo

reportado por [18]. Además, se evidencia que, aunque existen diferencias notables entre las variedades de mora, la variedad Vino espina roja fue la que obtuvo las mayores concentraciones de los compuestos de interés.

Siguiendo esta misma línea, Soto et al. [22] evaluaron el efecto del genotipo en la concentración de los compuestos polifenólicos en moras cultivadas en Costa Rica. Para esto, fueron comparadas cinco variedades de *R. adenotrichos* (Vino espina roja, Vino espina blanca, Vino sin espinas, Dulce y Enana), dos variedades de *R. urticifolius*, así como una variedad de *R. miser* y *R. glaucus*. Las variedades Vino sin espinas y Enana, fueron las que tuvieron el mayor contenido de elagitaninos y antocianinas, respectivamente; resultados que difirieron con los reportados por [24], lo anterior puede deberse a que la metodología de extracción y análisis de compuestos utilizada en los estudios fue distinta. Además, los autores determinaron el efecto de las condiciones medioambientales en el contenido polifenólico de la fruta para la variedad Vino espina roja (cuadro 1), siendo la localidad de Dota, cultivada bajo un régimen orgánico la que obtuvo las mayores concentraciones de los compuestos de interés, obteniendo más antocianinas en la época lluviosa y más elagitaninos en la época seca.

A partir de los reportes de [18] y [24], se puede concluir, que las frutas de mora menos maduras tienen un alto contenido de elagitaninos, pero que conforme la fruta va madurando, estos compuestos disminuyen y el contenido de antocianinas va en aumento. Las investigaciones mencionadas hasta este momento evidencian que el genotipo, el ambiente y la metodología de extracción y cuantificación empleada provocan variaciones en la concentración de los compuestos de interés.

Por último, Montero et al. [23] estudiaron la composición nutricional, contenido de compuestos potencialmente bioactivos y capacidad antioxidante de once frutas comestibles ampliando lo realizado por [19], donde la mora presentó valores intermedios en los análisis físico-químicos realizados en comparación a las otras frutas evaluadas, exceptuando en el pH (siendo la más ácida) y en el contenido de fibra dietética en base húmeda (obteniendo el valor más alto). Sin embargo, siendo congruente con los resultados obtenidos por otros investigadores, la mora presentó 1,5 veces más concentración de polifenoles y 2,5 veces mayor capacidad antioxidante (cuadro 1) que la segunda fruta en importancia evaluada, determinando que a pesar de que la mora no destaca por su contenido nutricional, sí posee una de las mayores capacidades antioxidantes y contenido polifenólico entre frutas de consumo en Costa Rica.

Efecto del procesamiento en los compuestos polifenólicos del jugo de mora

Tomando en cuenta que la mora frecuentemente se consume como bebida, existen varios reportes documentando el efecto que ocasionan diferentes técnicas de procesamiento industrial del jugo de la mora, sobre la concentración de los compuestos polifenólicos. Cisse et al. [29] determinaron el efecto de la temperatura en el contenido de antocianinas en los jugos de mora, naranja y jamaica, estableciendo que las antocianinas sufren degradación térmica. Los autores propusieron ecuaciones de primer orden, para modelar la degradación de las antocianinas por la temperatura, las cuales pueden ser utilizadas como una herramienta para determinar la pérdida de este compuesto en procesos térmicos.

Luego, Gancel et al. [20] evaluaron el efecto que tiene el procesamiento y almacenamiento de la fruta sobre el contenido de sus compuestos y su capacidad antioxidante. Para esto, elaboraron un diagrama del procesamiento de la fruta obteniendo extractos para cada etapa del proceso, las cuales fueron: frutas cortadas, pulpa, residuos, jugo y bebida. Además, determinaron el efecto de diferentes temperaturas de almacenamiento en la concentración de los compuestos de interés. La fruta inicial utilizada mostró resultados similares a los obtenidos previamente por otros autores. Sin embargo, el procesamiento de las muestras para la elaboración del

jugo redujo significativamente la concentración de elagitaninos y antocianinas. En general, se observó que la bebida de mora procesada obtuvo únicamente un 54% de todos los compuestos polifenólicos iniciales de la mora y su capacidad antioxidante disminuyó a la mitad. El escaldado que se realiza antes de cortar las frutas, fue el paso donde hubo una mayor disminución de antocianinas y el llenado en caliente para la elaboración de la bebida final, fue donde hubo una mayor disminución de elagitaninos. Además, durante el almacenamiento se presentó una pérdida adicional de los compuestos polifenólicos, la cual se ve incrementada al aumentar la temperatura.

Los resultados obtenidos por [20] y [29] evidencian que el aumento de temperatura es un factor crítico que afecta la estabilidad de los polifenoles, ya que procesos térmicos provocan una disminución en la concentración de estos compuestos. Por lo que, es necesario buscar formas alternativas de procesamiento del jugo que eviten el uso de estos métodos. Es por ello por lo que, Acosta et al. [30] propusieron la ultrafiltración para la separación y purificación de elagitaninos en mora como método alternativo. Frutas de mora cortadas fueron prensadas con una prensa hidráulica y posteriormente pretratadas enzimáticamente; el jugo obtenido fue clarificado mediante una microfiltración y concentrado bajo evaporación osmótica, probando diferentes membranas y presiones de filtración y controlando la temperatura en cada proceso. Se encontró una combinación de presión transmembrana (2MPa) y membrana (GK de GE Osmonics) capaz de retener el 100% de la concentración de elagitaninos con el mayor flujo de antocianinas, siendo una opción viable para separar y purificar estos compuestos del jugo de mora.

Soto et al. [21] determinaron el efecto de pretratamientos enzimáticos y mecánicos sobre la concentración de los polifenoles en el jugo. Además, seleccionaron los pretratamientos continuo y discontinuo, ambos con adición de enzima, para posteriormente pasar por un proceso de clarificación para determinar el efecto combinado de ambas técnicas en la concentración de los compuestos potencialmente bioactivos. De los cinco pretratamientos evaluados, la prensa continua con preparación enzimática, fue la que obtuvo la mejor recuperación de elagitaninos y antocianinas. Sin embargo, este método de extracción, cuando el jugo se clarificó, produjo una disminución en la concentración de las antocianinas y elagitaninos; contrario al método discontinuo con preparación enzimática, en el cual la clarificación no redujo la concentración de estos compuestos.

Acosta et al. [31] determinó el contenido de polifenoles totales del jugo de la mora bajo nanofiltración, luego de obtener el jugo mediante el método de extracción y clarificación reportado por [21]. La nanofiltración es una técnica que permite concentrar antocianinas y elagitaninos de una manera más eficiente y a menor costo, sin reducir los compuestos potencialmente bioactivos por efectos del calor. Los autores determinaron que utilizando una membrana NF270 a una presión transmembrana de 3MPa, se obtiene el mayor flujo de permeado y se retuvo más del 90% de total de sólidos solubles y el 100% de las antocianinas y elagitaninos [31]. Lo anterior, muestra que la nanofiltración debe ser considerado como un método factible para favorecer la concentración de los compuestos de interés en los jugos de la mora.

González et al. [32] realizaron una aproximación metabólica del jugo de la mora endulzado con estevia o con sacarosa, sin pasteurizar o pasteurizando bajo diferentes temperaturas de almacenamiento. Los autores reportaron que la composición de iones del jugo de mora varía entre los tratamientos evaluados, concluyendo que el procesamiento del jugo cambia la composición metabólica del mismo. Sin embargo, los autores no identificaron cuales compuestos metabólicos correspondían con los cambios de los iones, que permitieran aportar un mejor conocimiento de los cambios del jugo durante su procesamiento.

Por último, Quirós et al. [33] evaluaron el efecto de la extracción etanólica, la concentración térmica al vacío, la ultrafiltración y el secado por aspersion en los subproductos de la mora, el cual corresponde principalmente a semillas. Se determinó que el etanol al 57,1 % v/v con agua fue el solvente extractor óptimo para obtener los compuestos de interés. Además, la ultrafiltración permitió aumentar la concentración de los compuestos mayoritarios de los subproductos con una mayor pureza que la obtenida por la concentración térmica, mientras que el secado por aspersion disminuyó en aproximadamente un 80-90% la concentración de antocianinas y elagitaninos, siendo un proceso inviable para la formulación. Esto confirmó que, los procesos de concentración sin uso de calor, son mejores para la preservación de los elagitaninos.

Los trabajos mencionados en esta sección, exceptuando el de [32], muestran el impacto que tienen diferentes técnicas de procesamiento en la concentración de los elagitaninos y antocianinas en el jugo de mora (cuadro 1). La metodología para la obtención de jugo de mora con alto contenido de elagitaninos fue patentada [34] y representa un aporte de la factibilidad técnica para la explotación comercial de esta bebida.

Efectos bioactivos *in vitro* del jugo de la mora

Al comprobar que tanto la fruta de la mora, como el jugo procesado poseían los compuestos potencialmente bioactivos, se empezaron a realizar pruebas *in vitro* con el fin de determinar si estos compuestos presentaban posibles efectos benéficos para la salud. Cuevas-Rodríguez et al. [35] determinaron la concentración de polifenoles totales, la capacidad antioxidante y la inhibición de la respuesta proinflamatoria en líneas celulares de macrófagos utilizando diferentes extractos obtenidos de especies de mora silvestre. En todos los extractos evaluados, menos el rico en proantocianidinas, las muestras de *R. adenotrichos* fueron las que obtuvieron los valores más altos de polifenoles totales y capacidad antioxidante. Además, en términos generales, de los extractos probados, esta especie fue la que presentó los mayores porcentajes de inhibición entre las enzimas proinflamatorias evaluadas o en los compuestos que estas enzimas producen, como lo son el óxido nítrico y la prostaglandina, denotando que una dieta rica en moras podría reducir el estrés oxidativo.

Posteriormente, Azofeifa et al. [36] compararon la capacidad antioxidante y el efecto protector a la peroxidación lipídica de un jugo de mora fresco y uno microfiltrado. El jugo de mora microfiltrado presentó menor contenido de polifenoles totales, antocianinas y capacidad antioxidante mediante la prueba ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity), no así mediante la prueba del radical libre DPPH (2,2-Difenil-1-Picrilhidrazilo). Sin embargo, al evaluar la capacidad para proteger la peroxidación lipídica, no hubo diferencias con ambos jugos, tanto con el modelo de hígado, como el de liposomas, demostrando que, el procesamiento del jugo afecta la capacidad antioxidante pero no la capacidad protectora de la peroxidación lipídica.

Todas las células, incluidos los eritrocitos, presentan una defensa propia contra los oxidantes extracelulares conocido como sistema Cell-MAP, es por esta razón que González et al. [37] evaluaron la actividad antioxidante celular de eritrocitos (ERYCA) y el aporte que la protección antioxidante mediada por células (Cell-MAP) y la eliminación directa de radicales libres (ORAC) brindan a los eritrocitos de diferentes frutas. La prueba ERYCA reflejó que el Cell-MAP aporta de 3 a 4 veces más protección antioxidante a los glóbulos rojos que la eliminación directa de radicales libres, determinando el posible aporte del consumo de frutas en la capacidad antioxidante de las células. Además, en términos generales, la capacidad antioxidante global de los eritrocitos fue más alta en las bayas tropicales de Costa Rica (arándano y mora) que en las demás frutas evaluadas en este estudio.

Luego, Azofeifa et al. [38] determinaron la actividad antiinflamatoria y antioxidante *in vitro* de la mora mediante ORAC, la concentración inhibidora media máxima (IC_{50}) del jugo que se requiere para neutralizar al radical libre DPPH, la actividad de eliminación de óxido nítrico (NO) mediante IC_{50} , la inhibición de la producción del anión superóxido y de la interleucina-6 (IL-6), la inhibición de la peroxidación lipídica en liposomas e hígado, y realizaron un ensayo antiinflamatorio a una línea celular de macrófagos murinos. Se determinó que el jugo de mora presenta un IC_{50} de NO 12 veces menor y un IC_{50} de DPPH similar al del ácido elágico, con una capacidad antioxidante ocho veces mayor comparado con el mismo estándar. Además, al aumentar la dosis del extracto, se incrementó la capacidad de inhibición de la peroxidación lipídica, tanto en liposomas como en homogenizados de hígado. Asimismo, el extracto tuvo la capacidad de inhibir la producción del anión superóxido, del óxido nítrico y del IL-6. Estos resultados evidenciaron que los extractos de mora disminuyeron el estrés oxidativo de las células, protegiendo contra diferentes radicales libres y tienen potencial para disminuir procesos inflamatorios.

Calvo-Castro et al. [39] utilizaron líneas celulares epidérmicas humanas de queratinocitos y fibroblastos para evaluar el efecto del jugo de mora como protector contra los rayos ultravioleta B (UVB), el principal agente responsable del cáncer de piel. A las líneas celulares se les agregó una dilución de jugo de mora ultrafiltrado 2 h antes y 24 h después de ser irradiadas con rayos UVB. Los resultados mostraron un efecto fotoquimioprotector a las líneas celulares. Además, se determinó un aumento en la apoptosis de las células irradiadas, el cual es uno de los primeros mecanismos de defensa de las células de la piel para contrarrestar los efectos de agentes cancerígenos.

La pasteurización es un método térmico muy utilizado para reducir la concentración de patógenos en líquidos, el cual podría tener un efecto negativo en la concentración de los compuestos de interés, como se evidenció en los estudios relacionados al procesamiento del jugo. Debido a esto, Azofeifa et al. [40] determinaron si este proceso podría afectar la inhibición de la peroxidación lipídica, el ERYCA y la capacidad antioxidante del jugo de mora. Los autores probaron el control con un jugo pasteurizado a 75 °C y otro a 92° C. Los resultados que obtuvieron determinaron que la pasteurización no afectó el contenido de polifenoles totales ni elagitaninos, ni los valores de capacidad antioxidante, ERYCA e inhibición de la peroxidación lipídica en liposomas e hígado. Sin embargo, sí tuvo efectos negativos en la concentración de antocianinas, similar a lo obtenido por [29], en el IC_{50} del DPPH y en el IC_{50} del NO. No obstante, en términos generales, se puede concluir que la pasteurización mantuvo las propiedades biológicas de los compuestos bioactivos de la mora.

Azofeifa et al. [41] realizaron pruebas para determinar la actividad antioxidante de un jugo microfiltrado de mora en un proceso de digestión *in vitro*. Los resultados obtenidos demostraron que la digestión inicial con pepsina aumentó los valores de antocianinas y elagitaninos, sin embargo, el proceso de diálisis demostró una reducción significativa en la concentración, disminuyendo en más de un 50% en la muestra que se desecha al colon y en la muestra que representa la solución absorbida por el cuerpo. Sin embargo, los valores obtenidos de IC_{50} de DPPH y NO así como la capacidad antioxidante mostraron resultados similares entre sí en la inhibición de la peroxidación lipídica en liposomas e hígado y en el ERYCA. Los resultados obtenidos demuestran que, a pesar de que hay una disminución en los compuestos bioactivos de la mora luego de ser tratadas por las enzimas gastrointestinales, éstos presentar un efecto antioxidante similar en cada etapa.

Por último, Madrigal-Gamboa et al. [42] determinaron el impacto del procesamiento del jugo de la mora (fruta, pulpa, jugo microfiltrado y jugo diafiltrado) en el efecto citotóxico de los polifenoles bajo diferentes líneas celulares de cáncer. En términos generales, el contenido de polifenoles totales, elagitaninos y antocianinas disminuyeron en cada paso del proceso. Asimismo, la fruta sin procesar fue la que obtuvo los mayores efectos citotóxicos contra las diferentes líneas

celulares exceptuando la de piel. Además, las líneas celulares de colon, estómago e hígado presentaron un aumento significativo en la apoptosis celular comparadas al control, sugiriendo un potencial uso terapéutico y corroborando los resultados obtenidos por [39].

Los valores obtenidos en polifenoles totales, elagitaninos, antocianinas y capacidad antioxidante por [38], [40] y [41] son muy superiores al resto de las publicaciones mencionadas en el cuadro 1, obteniendo, por ejemplo, valores 30 veces menores en IC_{50} de DPPH (2,5-6,5 $\mu\text{g/ml}$) o 15 veces mayores en ORAC (4000-8000 $\mu\text{mol ET/g}$). Esto es debido a que los autores no cuantifican el peso húmedo o seco del jugo de mora, sino que lo hacen de un extracto purificado rico en polifenoles obtenido a través de una cromatografía de afinidad, razón por la cual, estos resultados no pueden ser comparados con la del resto de las investigaciones y fueron excluidos de el cuadro 1. Además, los resultados obtenidos en esta sección evidencian que, a pesar de que el procesamiento del jugo de mora afecta la concentración de los compuestos de interés, en términos generales, no afecta su efecto antioxidante en diferentes pruebas *in vitro*.

Efectos bioactivos *in vivo* del jugo de la mora

Las pruebas *in vitro* mostraron que los compuestos polifenólicos presentan un uso potencial como agentes antioxidantes benéficos para la salud, por lo que el siguiente paso a seguir es evaluar su efecto a través de pruebas *in vivo*. La urolitina es un compuesto producido por las bacterias intestinales al degradar alimentos que contengan elagitaninos y ácido elágico, a los cuales se les atribuye un efecto benéfico al disminuir el envejecimiento celular y contrarrestar enfermedades como la obesidad, diabetes, problemas cardiovasculares o cáncer, entre muchas otras [43].

Debido a esto, García-Muñoz et al. [44] analizaron muestras de orina de 26 individuos con el fin de encontrar urolitina. La investigación determinó que existen tres grupos de individuos diferentes de acuerdo con la concentración de urolitinas en la orina. El primero no presentó concentraciones de urolitina A ni B, el segundo grupo presentó altas concentraciones de urolitina A y el último grupo presentó niveles elevados de urolitina B, lo que permite generar evidencia sobre la variabilidad interindividuo en la digestión de frutas con componentes benéficos para la salud. Además, que existe una interacción con la comida y la microbiota de cada individuo, lo que permite una absorción diferencial de los elagitaninos y su conversión a urolitinas.

El estrés oxidativo y el desbalance en las especies reactivas de oxígeno juegan un papel importante en la aparición de enfermedades como la diabetes, hiperglicemia y resistencia a la insulina, así como en problemas cardiovasculares y complicaciones renales. El estudio de Azofeifa et al. [45] analizó el efecto que tiene la bebida de mora en ratones Sprague-Dawley que fueron inducidos a diabetes. Los ratones diabéticos tuvieron una pérdida de peso mientras que el grupo control, más bien aumentó de peso. Sin embargo, las ratas diabéticas que fueron alimentadas con jugo de mora, especialmente las que contenía un 25% v/v jugo de mora:agua, mostraron una reducción de un 50% en la concentración de glucosa en sangre, así como una reducción en diferentes indicadores: 30% en el colesterol, 20% en la peroxidación lipídica en el hígado y de un 45% en los triglicéridos. Los resultados obtenidos por los investigadores demostraron que beber jugo de mora mejora el control de la glucemia y reduce la concentración de lípidos en la sangre, sugiriendo que puede ser utilizado como una alternativa alimenticia para el control de la diabetes.

Madrigal et al. [46] determinaron el poder antioxidante y las características fisicoquímicas de formulaciones dermo-cosméticas a partir de extractos de mora. Los autores realizaron diferentes metodologías de extracción y utilizaron diferentes solventes orgánicos, obteniendo tanto las fases acuosas como las fases orgánicas. Los resultados obtenidos determinaron que las formulaciones a base de mora son potencialmente bacteriostáticos, hidratantes de la

piel, nutritivas y evitan el envejecimiento y las arrugas en la piel. El producto formulado, posee propiedades astringentes que le permiten ayudar a cicatrizar pequeñas heridas superficiales de la piel y su pH ácido es beneficioso para mantener el manto ácido cutáneo y favorecer la flora normal de la piel.

Quesada-Morúa et al. [47] evaluaron a trece individuos sin historial médico de enfermedades cardiovasculares, hepáticas, renales o gastrointestinales en dos grupos diferentes. Primeramente, ambos grupos tuvieron una dieta baja en antioxidantes durante tres días, luego, al cuarto día y hasta el día 11, la dieta se cambió a un consumo promedio de 4000 kcal/día, alta en carbohidratos y grasas. El primer grupo en cada comida consumía 250 ml de jugo microfiltrado de mora, mientras que el grupo 2 bebía agua. Al finalizar este período, cada individuo retomaba su vida cotidiana por 16 días, y posteriormente se repetía la metodología, pero intercambiando los grupos. En promedio, el grupo que tomó mora obtuvo valores menores a los expresados inicialmente, en la concentración de colesterol, triglicéridos, lipoproteínas de baja densidad (LDL), lipoproteínas de alta densidad (HDL) y de glucosa en sangre. Los resultados obtenidos sugieren que la bebida de mora puede tener beneficios cardiovasculares.

Los resultados obtenidos por [44] sugieren que, en una muestra reducida de 26 individuos, la respuesta de un alimento nutraceutico como la mora, depende mucho de la flora intestinal del individuo, por lo que, los resultados obtenidos por [47], aunque son prometedores, deben ampliarse a un número mayor de individuos, con el fin de evaluar esa variabilidad interindividuo que podría provocar efectos benéficos a algunas personas, pero a otras no, con el fin de llegar a conclusiones más robustas y confiables.

Producción de compuestos polifenólicos en la mora mediante técnicas biotecnológicas

Para aprovechar los compuestos bioactivos de la mora, estos se pueden obtener a través de la fruta o el jugo; sin embargo, también es posible hacer uso de herramientas biotecnológicas para obtenerlos, tomando en cuenta que la producción de mora en campo depende de las condiciones medioambientales y el grado de madurez de la fruta [18] [22] [24]. Por esta razón, Martínez-Cruz et al. [48] escarificaron semillas de mora y las pusieron bajo dos medios de cultivo diferente para favorecer la germinación; asimismo hojas de este cultivo fueron sometidas a la formación de callo con diferentes medios de cultivo. Los autores reportaron los mayores índices de germinación al remover la cubierta de la semilla, en un medio de cultivo sin reguladores de crecimiento, y obtuvieron un callo friable de color morado, tanto en un medio Murashige y Skoog (MS) suplementado con ácido naftalenacético y kinetina, como en un medio WPM (Woody Plant médium) suplementado con polivinilpirrolidona, ácido ascórbico y 2,4-diclorofenoxiacético. El callo es definido como un aglomerado de células indiferenciadas que sirve como base para los cultivos de células en suspensión en cultivos en matraces o en biorreactores; Sin embargo, los autores no cuantificaron el contenido de los compuestos polifenólicos en los callos, por lo que generaron una estrategia de producción de células desconociendo si tenían potencial para la producción de los compuestos de interés.

Schmidt-Durán et al. [49] indujeron callo a partir de segmentos de hoja de plantas de mora y establecieron suspensiones celulares finas con fines de producción de los compuestos potencialmente bioactivos de manera *in vitro*. Los autores determinaron las cinéticas de crecimiento en callo y las células en suspensión de mora, obteniendo una concentración de 0,0256 mg EAG/g de peso fresco a una concentración de $1,0 \times 10^6$ células/ml de un extracto del cultivo celular.

Posteriormente, Schmidt-Durán et al. [50] optimizaron las condiciones de crecimiento en matraz para la obtención de los compuestos de interés. Los autores determinaron que el metanol con células liofilizadas era el método de extracción donde obtenían la mayor concentración

de los compuestos de interés. Además, evidenciaron que utilizando un tapón de algodón en el erlenmeyer conteniendo el medio de cultivo Gamborg suplementado con 1 mg/l de ácido indobutírico, 5 mg/l de 6-bencilaminopurina, 20 mg/l de L-glutamina y 200 mg/l de caseína hidrolizada incrementan considerablemente la producción de los metabolitos secundarios analizados en las células en suspensión, obteniendo 0,313 mg equivalentes de ácido gálico/g de polifenoles totales; 3,647 μ mol equivalentes de Trolox/g de capacidad antioxidante mediante DPPH; 0,135 mg equivalentes de ácido elágico/g de ácido elágico y 2,389 mg equivalente de vanillina/g; considerando que los resultados obtenidos por los autores están expresados por gramo de peso seco de células en suspensión.

Las investigaciones realizadas por [49] y [50] determinaron que el uso de herramientas biotecnológicas para la producción de células vegetales en cultivos líquidos en suspensión también es una posibilidad para obtener los compuestos de interés reportados en la fruta y el jugo de la mora, brindando la posibilidad de estandarizar y optimizar las condiciones de crecimiento para la obtención de estos compuestos a través de cultivos celulares con miras a su producción en biorreactores.

Perspectivas futuras

De acuerdo con las investigaciones realizadas en *R. adenotrichos*, es necesario profundizar en el conocimiento de cómo las condiciones medioambientales (relación genotipo:ambiente) intervienen en la producción de los compuestos de interés, que permita generar estrategias a nivel agronómico que favorezcan la concentración de los compuestos polifenólicos en el cultivo, dando un valor agregado a la comercialización de la fruta o la venta de productos agroindustriales, como alimento funcional. Adicionalmente, las investigaciones con cultivos celulares *in vitro* y su posible escalamiento en biorreactores, tema poco estudiado hasta el momento en este cultivo, abre la posibilidad de contar con condiciones controladas que permitan aumentar la concentración de los compuestos de interés y puedan ser usados posteriormente a nivel macrobiótico o como un aditivo alimenticio. Por último, es necesario seguir realizando investigaciones *in vivo*, que permitan ampliar el conocimiento de los posibles efectos benéficos que consumir mora podría tener para mejorar la calidad de vida de las personas.

Conclusiones

Esta revisión logró determinar que *R. adenotrichos* presenta una serie de compuestos potencialmente bioactivos, especialmente elagitaninos y antocianinas en la fruta, las cuales presentan una alta capacidad antioxidante comparado a otras frutas; no obstante, el procesamiento de la fruta para la elaboración de jugo disminuye considerablemente la concentración de estos compuestos. A pesar de esto, el efecto antioxidante *in vitro* del jugo no se ve afectado, ya que se ha logrado demostrar que tiene potencial antioxidante al inhibir diferentes radicales libres y un posible efecto benéfico al inhibir la peroxidación lipídica, ayudar en procesos antiinflamatorios y tener un efecto fotoquimioprotector y apoptótico en líneas celulares cancerígenas. Además, *in vivo*, el jugo de mora puede tener efectos cardiovasculares benéficos, y al ser digerido, puede producir urolitinas, moléculas muy estudiadas por sus posibles efectos beneficiosos para la salud. Por último, a nivel biotecnológico, hay un gran potencial de poder utilizar cultivos celulares de mora en biorreactores, que permitan generar un bioproceso para la producción de estos compuestos a gran escala y de una manera comercial.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ph.D Randall Chacón por sus recomendaciones al manuscrito.

Financiamiento

El trabajo se financió por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (Proyecto 1510121).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- [1] J. J. Castro y M. M. Cerdas, "Mora (*Rubus* spp). Cultivo y manejo poscosecha," Costa Rica, Imprenta Nacional, 2005.
- [2] D. Flores, A. Montero, R. Orozco y F. Arguello, "Primer Foro-Taller Nacional sobre el cultivo de la mora (*Rubus* spp.)," Costa Rica, Editorial Centro de Información Tecnológica, 2003.
- [3] C. E. Finn, "Blackberries," en *Temperate Fruit Crop Breeding*, F. Hancock, ed, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 83-114, 2008. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6907-9_3
- [4] R. M. Brennan, P. S. Caligari, J. R. Clark, P. N. Brás de Oliveira, C. E. Finn, J. F. Hancock, et al., "Berry Crops," en *Horticulture: Plants for people and places, Volume 1*, G. R. Dixon, D. E. Aldous, eds, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 301-325, 2014. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8578-5_9
- [5] J. Graham y M. Woodhead, "Rubus," en *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources*, C. Kole, ed, Springer, Heidelberg, Berlin, pp. 179-196, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16057-8_9
- [6] J. Lee, M. Dossett y C. E. Finn, "Rubus fruit phenolic research: The good, the bad, and the confusing," *Food Chem*, vol. 130, pp. 785-796, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.022>
- [7] C. Gonzalez y E. Perez, "Extracción enzimática de esteviolglucósidos en jugo de mora (*Rubus adenotrichus*)," *Rev Colomb Investig Agroindustriales*, vol. 4, no. 1, pp. 24-38, 2017. <https://doi.org/10.23850/24220582.663>
- [8] K. Rodríguez-Díaz, H. Silva-Rojas, J. Boyzo-Marin, S. Segura-Ledesma, S. Leyva-Mir, Á. Rebollar-Alviter, "Molecular detection of *Peronospora sparsa* in sources of primary inoculum and components of resistance in wild blackberry species," *Eur J Plant Pathol*, vol. 149, no. 4, pp. 845-851, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1232-7>
- [9] S. Segura, A. Rebollar-Alviter, J. Boyzo-Marin, M. Hernández-Bello y J. López-Medina, "Genetic resources of blackberry wild species in Michoacan, Mexico," *Acta Horti*, vol. 946, pp. 107-111, 2012. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.946.14>
- [10] D. Flores-Mora y F. Argüello-Delgado, "Cultivo de la mora. Innovaciones Tecnológicas," Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2005.
- [11] D. Flores, R. Chacón, V. Jiménez y F. Ortiz, "Enraizamiento de mora (*Rubus adenotrichus*) en medio líquido en el sistema de inmersión temporal y su aclimatación en invernadero," *Tecnol Marcha*, vol. 25, no. 2, pp. 3-9, 2012. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.300>
- [12] D. Flores, R. Chacón, L. Alvarado, A. Schmidt, C. Alvarado y J. Chaves, "Effect of using two different types of carbon nanotubes for blackberry (*Rubus adenotrichus*) *in vitro* plant rooting, growth and histology," *Am J Plant Sci*, vol. 05, no. 24, pp. 3510-3518, 2014. <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.524367>
- [13] R. Orozco-Rodríguez, D. Flores-Mora y F. Argüello-Delgado, "Efecto de diferentes tipos de propagación en el rendimiento de mora vino (*Rubus adenotrichus*)," *Agron Mesoam*, vol. 22, no. 1, pp. 91-97, 2011. <https://doi.org/10.15517/am.v22i1.8671>
- [14] R. Orozco y R. Muñoz, "Efecto de abonos orgánicos en las propiedades químicas del suelo y en rendimiento de la mora (*Rubus adenotrichus*) en dos zonas agroecológicas de Costa Rica," *Tecnol Marcha*, vol. 25, no. 1, pp. 16-31, 2012. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i1.173>
- [15] M. Orozco-Aceves, J. Calvo-Araya, J. Gamboa-Tabares, W. Peraza-Padilla, O. Varela-Rodríguez y R. Orozco-Rodríguez, "Efecto de dos abonos orgánicos en las cadenas tróficas del suelo cultivado con mora," *Agron Mesoam*, vol. 28, no. 3, pp. 619-628, 2017. <https://doi.org/10.15517/ma.v28i3.25861>
- [16] T. J. Park, J. G. Martin y R. Linhardt, "Pharmacological applications of biocompatible carbon nanotubes and their emerging toxicology issues," en *Medicinal chemistry and pharmacological potential of fullerenes and carbon nanotubes. Carbon Materials: Chemistry and Physics*, vol 1, F. Cataldo, T. Da Ros, eds, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 283-316, 2008. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6845-4_12

- [17] C. Mertz, V. Cheynier, Z. Günata y P. Brat, "Analysis of phenolic compounds in two blackberry species (*Rubus glaucus* and *Rubus adenotrichus*) by high-performance liquid chromatography with diode array detection and electrospray ion trap mass spectrometry," J Agric Food Chem, vol. 55, no. 21, pp. 8616-8624, 2007. <https://doi.org/10.1021/jf071475d>
- [18] O. Acosta-Montoya, F. Vaillant, S. Cozzano, C. Mertz, A. Pérez y M. Castro, "Phenolic content and antioxidant capacity of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichus* Schldtl.) during three edible maturity stages," Food Chem, vol. 119, no. 4, pp. 1497-1501, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.032>
- [19] C. Mertz, A. Gancel, Z. Gunata, P. Alter, C. Dhuique-Mayer, F. Vaillant, et al., "Phenolic compounds, carotenoids and antioxidant activity of three tropical fruits," J Food Compos Anal, vol. 22, no. 5, pp. 381-387, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.06.008>
- [20] A. Gancel, A. Feneuil, O. Acosta, A. Pérez y F. Vaillant, "Impact of industrial processing and storage on major polyphenols and the antioxidant capacity of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichus*)," Food Res Int, vol. 44, no. 7, pp. 2243-2251, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.06.013>
- [21] M. Soto, O. Acosta, F. Vaillant y A. Pérez, "Effects of mechanical and enzymatic pretreatments on extraction of polyphenols from blackberry fruits," J Food Process Eng, vol. 39, no. 5, pp. 492-500, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12240>
- [22] M. Soto, A. Pérez, M. Cerdas, F. Vaillant y O. Acosta, "Physicochemical characteristics and polyphenolic compounds of cultivated blackberries in Costa Rica," J Berry Res, vol. 9, no. 2, pp. 283-296, 2019. <https://doi.org/10.3233/jbr-180353>
- [23] M. Montero, C. Rojas-Garbanzo, J. Usaga y A. Pérez, "Composición nutricional, contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante hidrofílica de frutas costarricenses seleccionadas," Agron Mesoam, vol. 33, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.46175>
- [24] M. Araya, Y. Carvajal, V. Alvarez, R. Orozco y G. Rodriguez, "Polyphenol characterization of three varieties of blackberry fruits (*Rubus adenotrichos*), cultivated in Costa Rica," J Berry Res, vol. 7, no. 2, pp. 97-107, 2017. <https://doi.org/10.3233/jbr-170150>
- [25] J. P. Rojas-Llanes, J. R. Martínez y E. E. Stashenko, "Contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de extractos de mora (*Rubus glaucus* Benth) obtenidos bajo diferentes condiciones," Rev Vitae, vol. 21, no. 3, pp. 218-227, 2014. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.18852>
- [26] H. P. Makkar, "Measurement of total phenolics and tannins using Folin-Ciocalteu method," en Quantification of tannins in tree and shrub foliage, H. P. Makkar, ed, Springer, Dordrecht, Netherlands, pp. 49-51, 2003. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0273-7_3
- [27] S. Vijayalaxmi, S. K. Jayalaksmi y K. Sreeramulu, "Polyphenols from different agricultural residues: extraction, identification and their antioxidant properties," J Food Sci Technol, vol. 52, no. 5, pp. 2761-2769, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1295-9>
- [28] N. Martínez-Cruz, K. Arévalo-Niño, M. J. Verde-Star, C. Rivas-Morales, A. Randay-Cárdenas, M. A. Núñez-González, et al., "Antocianinas y actividad anti radicales libres de *Rubus adenotrichus* Schldtl (zarzamora)," Rev Mex Cienc Farm, vol. 42, no. 4, pp. 66-71, 2011.
- [29] M. Cisse, F. Vaillant, O. Acosta, C. Dhuique-Mayer y M. Dornier, "Thermal degradation kinetics of anthocyanins from blood orange, blackberry, and roselle using the arrhenius, eyring, and ball models," J Agric Food Chem, vol. 57, no. 14, pp. 6285-6291, 2009. <https://doi.org/10.1021/jf900836b>
- [30] O. Acosta, F. Vaillant, A. Pérez y M. Dornier, "Potential of ultrafiltration for separation and purification of ellagitannins in blackberry (*Rubus adenotrichus* Schldtl.) juice," Sep Purif Technol, vol. 125, pp. 120-125, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.037>
- [31] O. Acosta, F. Vaillant, A. Pérez y M. Dornier, "Concentration of polyphenolic compounds in blackberry (*Rubus adenotrichos* Schldtl.) juice by nanofiltration," J Food Process Eng, vol. 40, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12343>
- [32] C. González, L. Hernández y F. Vaillant, "Análisis de un jugo de mora (*Rubus adenotrichos*) endulzado con estevia (*Stevia rebaudina* Bertoni), una aproximación metabólica," Rev Udca Actual Divul Cient, vol. 20, no. 1, pp. 121-129, 2017. <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.69>
- [33] A. Quirós, O. Acosta, E. Thompson y M. Soto, "Effect of ethanolic extraction, thermal vacuum concentration, ultrafiltration, and spray drying on polyphenolic compounds of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichos* Schldtl.) by-product," J Food Process Eng, vol. 42, no. 4, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13051>
- [34] O. Acosta, F. Vaillant, M. Dornier y A. M. Pérez, "Método para la obtención de un extracto rico en taninos del ácido elágico a partir de frutos que contienen estos compuestos y extracto obtenido usando dicho método,"

- [Internet]. Patente Internacional 2012/152232, [Noviembre 15, 2012](#). Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2012152232&_fid=US124047089.
- [35] E. O. Cuevas-Rodríguez, V. P. Dia, G. G. Yousef, P. A. García-Saucedo, J. López-Medina, O. Paredes-López, et al., "Inhibition of pro-inflammatory responses and antioxidant capacity of Mexican blackberry (*Rubus* spp.) extracts," *J Agric Food Chem*, vol. 58, no. 17, pp. 9542-9548, 2010. <https://doi.org/10.1021/jf102590p>
- [36] G. Azofeifa, S. Quesada y A. Pérez, "Effect of the microfiltration process on antioxidant activity and lipid peroxidation protection capacity of blackberry juice," *Rev Bras Farmacogn*, vol. 21, no. 5, pp. 829-834, 2011. <https://doi.org/10.1590/s0102-695x2011005000133>
- [37] E. González, F. Vaillant, A. Pérez y G. Rojas, "*In vitro* cell-mediated antioxidant protection of human erythrocytes by some common tropical fruits," *J Nutr Food Sci*, vol. 2, no. 3, 2012. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000139>
- [38] G. Azofeifa, S. Quesada, F. Boudard, M. Morena, J. Cristol, A. Pérez, et al., "Antioxidant and anti-inflammatory *in vitro* activities of phenolic compounds from tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichos*)," *J Agric Food Chem*, vol. 61, no. 24, pp. 5798-5804, 2013. <https://doi.org/10.1021/jf400781m>
- [39] L. Calvo-Castro, D. Syed, J. Chamcheu, F. Vilela, A. Pérez, F. Vaillant, et al., "Protective effect of tropical highland blackberry juice (*Rubus adenotrichos* Schltld.) against UVB-mediated damage in human epidermal keratinocytes and in a reconstituted skin equivalent model," *Photochem Photobiol*, vol. 89, no. 5, pp. 1199-1207, 2013. <https://doi.org/10.1111/php.12104>
- [40] G. Azofeifa, S. Quesada, A. Pérez, F. Vaillant y A. Michel "Pasteurization of blackberry juice preserves polyphenol-dependent inhibition for lipid peroxidation and intracellular radicals," *J Food Compos Anal*, vol. 42, pp. 56-62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.01.015>
- [41] G. Azofeifa, S. Quesada, A. Pérez, F. Vaillant y A. Michel, "Effect of an *in vitro* digestion on the antioxidant capacity of a microfiltrated blackberry juice (*Rubus adenotrichos*)," *Beverages*, vol. 4, no. 2, pp. 30, 2018. <https://doi.org/10.3390/beverages4020030>
- [42] V. Madrigal-Gamboa, J. Jiménez-Arias, O. Hidalgo, S. Quesada, A. Pérez y G. Azofeifa, "Membrane processing effect of blackberry (*Rubus adenotrichos*) on cytotoxic and pro-apoptotic activities against cancer cell lines," *J Food Process Preserv*, vol. 45, no. 6, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15575>
- [43] D. D'Amico, M. Olmer, A. M. Fouassier, P. Valdés, P. Andreux, C. Rinsch, et al., "Urolithin A improves mitochondrial health, reduces cartilage degeneration, and alleviates pain in osteoarthritis," *Trends Mol Med*, vol. 27, no. 7, pp. 687-699, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2021.04.009>
- [44] C. García-Muñoz, L. Hernández, A. Pérez y F. Vaillant, "Diversity of urinary excretion patterns of main ellagittannins' colonic metabolites after ingestion of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichus*) juice," *Food Res Int*, vol. 55, pp. 161-169, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.049>
- [45] G. Azofeifa, S. Quesada, L. Navarro, O. Hidalgo, K. Portet, A. Pérez, et al., "Hypoglycaemic, hypolipidaemic and antioxidant effects of blackberry beverage consumption in streptozotocin-induced diabetic rats," *J Funct Foods*, vol. 26, pp. 330-337, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2016.08.007>
- [46] G. Madrigal, R. Vargas, G. Carazo, N. Ramirez, L. Fonseca y J. Campos, "*Rubus adenotrichus* fruits extracts phytochemical characterization and antioxidant power evaluation for dermocosmetics formulation," *Int J Phytocosmetics Nat Ingred*, vol. 4, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.15171/ijpni.2017.05>
- [47] M. Quesada-Morúa, O. Hidalgo, J. Morera, G. Rojas, A. Pérez, F. Vaillant, et al., "Hypolipidaemic, hypoglycaemic and antioxidant effects of a tropical highland blackberry beverage consumption in healthy individuals on a high-fat, high-carbohydrate diet challenge," *J Berry Res*, vol. 10, no. 3, pp. 459-474, 2020. <https://doi.org/10.3233/jbr-190516>
- [48] N. S. Martínez-Cruz, K. Arévalo-Niño, M. J. Verde-Star, A. Oranday-Cárdenas, C. Rivas-Morales, J. Treviño-Neávez, et al., "Germinación *in vitro* e inducción de callo en *Rubus adenotrichus* Schltld.," *Polibotánica*, vol. 35, pp. 99-107, 2013.
- [49] A. Schmidt-Durán, C. Alvarado-Ulloa, R. Chacón-Cerdas, L. Alvarado-Marchena y D. Flores-Mora, "Callogenesis and cell suspension establishment of tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichos* Schltld.) and its microscopic analysis," *Springerplus*, vol. 5, no. 1, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3381-0>
- [50] A. Schmidt-Durán, L. A. Calvo-Castro, C. Alvarado-Ulloa, O. Acosta-Montoya y M. Rodríguez-Monroy, "Cell suspension cultures for the production of antioxidant phenolic compounds: experiments with tropical highland blackberry (*Rubus adenotrichos* Schltld. cv. Vino)," *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02428-9>

- [51] Y. Choi y M. Okos, "Effect of temperature and composition on the thermal properties of foods," en: Food Engineering and Process Applications, Vol. 1, L. M. Maguer, P. Jelen, eds, New York, Elsevier, pp. 93-101, 1986.

Anexos

Cuadro 1. Polifenoles totales, capacidad antioxidante, antocianinas y elagitaninos reportados por gramo de peso seco obtenidos a partir de *Rubus adenotrichos* Schltdl. de las diferentes investigaciones.

Cita	Polifenoles totales	Capacidad antioxidante	Compuestos polifenólicos
Investigaciones que utilizaron la fruta de la mora			
[17]	Técnica Folin-Ciocalteu 63 mg EAG/g		Técnica HPLC-DAD Elagitaninos 10,18 mg/g Antocianinas 7,20 mg/g
[19] ¹	Técnica Folin-Ciocalteu 63 mg EAG/g	Técnica ORAC Extracto crudo: 106,86 µmol ET/g Extracto de acetona: 243,43 µmol ET/g Extracto de acetona lavado: 249,14 µmol ET/g Extracto de XAD-7: 220,57 µmol ET/g Extracto de hexano: 0,69 µmol ET/g	
[18]	Técnica Folin-Ciocalteu Grado 1: 33,7 mg EAG/g Grado 2: 29,0 mg EAG/g Grado 3: 35,0 mg EAG/g	Técnica ORAC Grado 1: 222 µmol ET/g Grado 2: 269 µmol ET/g Grado 3: 432 µmol ET/g	Técnica HPLC-DAD Elagitaninos Grado 1: 22,0 mg EAE/g Grado 2: 20,0 mg EAE/g Grado 3: 14,6 mg EAE/g Antocianinas Grado 1: 1,14 mg EC3G/g Grado 2: 3,49 mg EC3G/g Grado 3: 8,96 mg EC3G/g Método diferencial de pH Antocianinas Grado 1: 0,5 mg EC3G/g Grado 2: 1,8 mg EC3G/g Grado 3: 5,2 mg EC3G/g

[28]	Técnica Folin-Ciocalteu 29,23 mg EAG/g	Técnica IC50 DPPH 148 µg/ml	Técnica HPLC Antocianinas 11,5 mgEC3G/g Técnica Método diferencial de pH Antocianinas 12,3 mg/g
[24]	Técnica Folin-Ciocalteu Dulce Grado 1: 83 mg EAG/g Grado 2: 20,3 mg EAG/g Grado 3: 13,5 mg EAG/g Sin espinas Grado 1: 93,0 mg EAG/g Grado 2: 25,3 mg EAG/g Grado 3: 17,6 mg EAG/g Espina roja Grado 1: 104,0 mg EAG/g Grado 2: 31,0 mg EAG/g Grado 3: 20,0 mg EAG/g	Técnica ORAC Dulce Grado 1: 1781 µmol ET/g Grado 2: 866 µmol ET/g Grado 3: 551 µmol ET/g Sin espinas Grado 1: 2131 µmol ET/g Grado 2: 1230 µmol ET/g Grado 3: 767 µmol ET/g Espina roja Grado 1: 2805 µmol ET/g Grado 2: 1543 µmol ET/g Grado 3: 994 µmol ET/g	Técnica Método diferencial de pH Antocianinas Dulce Grado 1: 0,71 mg /g Grado 2: 2,02 mg /g Grado 3: 9,0 mg /g Sin espinas Grado 1: 0,92 mg/g Grado 2: 2,37 mg/g Grado 3: 11,3 mg/g Espina roja Grado 1: 1,38 mg/g Grado 2: 3,30 mg/g Grado 3: 15,40 mg/g
[22]			Técnica HPLC-DAD Elagitaninos Vino espina roja: 32,0 mg EAE/g Vino espina blanca: 27,0 mg EAE/g Vino sin espinas: 47,0 mg EAE/g Dulce: 23,0 mg EAE/g Enana: 15,3 mg EAE/g Antocianinas Vino espina roja: 10,1 mg EC3G/g Vino espina blanca: 10,3 mg EC3G/g Vino sin espinas: 7,5 mg EC3G/g Dulce: 4,7 mg EC3G/g Enana: 12,0 mg EC3G/g
[23] ¹	Técnica Folin-Ciocalteu 32,02 mg EAG/g	Técnica ORAC 369,64 µmol ET/g	
Cita	Polifenoles totales	Capacidad antioxidante	Compuestos polifenólicos
Investigaciones que utilizaron el jugo de la mora			
[29] ^{2,3}			Técnica Método diferencial de pH Antocianinas Filtrado: 16,48 mg EC3G/g Pulpa: 14,40 mg EC3G/g

<p>[20]¹</p>	<p>Técnica Folin-Ciocalteu</p> <p>Frutas congeladas: 31,41 mg EAG/g</p> <p>Pulpa tamizada: 44,22 mg EAG/g</p> <p>Residuos gruesos: 11,37 mg EAG/g</p> <p>Pulpa pasteurizada: 50,30 mg EAG/g</p> <p>Residuos finos: 41,34 mg EAG/g</p> <p>Pulpa congelada: 50,97 mg EAG/g</p> <p>Jugo descongelado: 54,06 mg EAG/g</p> <p>Bebida a base de fruta: 5,29 mg EAG/g</p> <p>Producto final: 4,90 mg EAG/g</p>	<p>Técnica ORAC</p> <p>Frutas congeladas: 306,81 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Pulpa tamizada: 471,96 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Residuos gruesos: 131,18 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Pulpa pasteurizada: 533,33 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Residuos finos: 403,96 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Pulpa congelada: 607,53 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Jugo descongelado: 578,12 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Bebida a base de fruta: 54,90 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Producto final: 46,84 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Técnica DPPH</p> <p>Frutas congeladas: 223,04 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Pulpa tamizada: 282,24 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Residuos gruesos: 71,10 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Pulpa pasteurizada: 416,16 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Residuos finos: 412,38 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Pulpa congelada: 330,11 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Jugo descongelado: 398,44 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Bebida a base de fruta: 42,16 $\mu\text{mol ET/g}$</p> <p>Producto final: 33,67 $\mu\text{mol ET/g}$</p>	<p>Técnica HPLC-DAD</p> <p>Elagitaninos</p> <p>Frutas congeladas: 9,86 mg EAE/g</p> <p>Pulpa tamizada: 14,89 mg EAE/g</p> <p>Residuos gruesos: 2,12 mg EAE/g</p> <p>Pulpa pasteurizada: 18,66 mg EAE/g</p> <p>Residuos finos: 13,58 mg EAE/g</p> <p>Pulpa congelada: 18,62 mg EAE/g</p> <p>Jugo descongelado: 19,45 mg EAE/g</p> <p>Bebida a base de fruta: 1,34 mg EAE/g</p> <p>Producto final: 0,91 mg EAE/g</p> <p>Antocianinas</p> <p>Frutas congeladas: 7,23 mg EC3G/g</p> <p>Pulpa tamizada: 8,70 mg EC3G/g</p> <p>Residuos gruesos: 0,85 mg EC3G/g</p> <p>Pulpa pasteurizada: 9,60 mg EC3G/g</p> <p>Residuos finos: 5,05 mg EC3G/g</p> <p>Pulpa congelada: 10,61 mg EC3G/g</p> <p>Jugo descongelado: 10,94 mg EC3G/g</p> <p>Bebida a base de fruta: 1,13 mg EC3G/g</p> <p>Producto final: 0,98 mg EC3G/g</p>
<p>[30]²</p>		<p>Técnica ORAC</p> <p>238,89 $\mu\text{mol ET/g}$</p>	<p>Técnica HPLC-DAD</p> <p>Elagitaninos</p> <p>3,39 mg EAE/g</p> <p>Antocianinas</p> <p>2,44 mg EC3G/g</p>

[21]			<p>Técnica HPLC-DAD</p> <p>Elagitaninos</p> <p>Extracción: 18,87 mg EAE/g</p> <p>Clarificación: 15,46 mg EAE/g</p> <p>Finalizador de frutas: 15,89 mg EAE/g</p> <p>Prensado discontinuo: 4,37 mg EAE/g</p> <p>Enzima con prensado discontinuo: 7,99 mg EAE/g⁴</p> <p>Enzima con prensado discontinuo y clarificado: 6,85 mg EAE/g</p> <p>Prensado continuo: 16,71 mg EAE/g</p> <p>Enzima con prensado continuo: 18,09 mg EAE/g⁴</p> <p>Enzima con prensado continuo y clarificado: 9,99 mg EAE/g</p> <p>Antocianinas</p> <p>Extracción: 7,62 mg EC3G/g</p> <p>Clarificación: 10,36 mg EC3G/g</p> <p>Finalizador de frutas: 11,02 mg EC3G/g</p> <p>Prensado discontinuo: 7,03 mg EC3G/g</p> <p>Enzima con prensado discontinuo: 12,24 mg EC3G/g⁴</p> <p>Enzima con prensado discontinuo y clarificado: 14,02 mg EC3G/g</p> <p>Prensado continuo: 10,97 mg EC3G/g</p> <p>Enzima con prensado continuo: 13,51 mg EC3G/g⁴</p> <p>Enzima con prensado continuo y clarificado: 12,75 mg EC3G/g</p>
[31] ²			<p>Técnica HPLC-DAD</p> <p>Elagitaninos</p> <p>3,39 mg EAE/g</p> <p>Antocianinas</p> <p>2,44 mg EC3G /g</p>

[33]	<p>Técnica Folin-Ciocalteu Fruta: 32,06 mg EAG/g Extracción: 289,92 mg EAG/g Concentración térmica al vacío: 274,35 mg EAG/g Retenido de la Ultrafiltración: 337,11 mg EAG/g Permeado de la ultrafiltración: 111,63 mg EAG/g Polvo del extracto: 29,57 mg EAG/g Polvo del concentrado: 41,86 mg EAG/g Polvo del retenido ultrafiltrado: 30,88 mg EAG/g</p>		<p>Técnica HPLC-DAD Elagitaninos Fruta: 7,75 mg EAE/g Extracción: 55,47 mg EAE/g Concentración térmica al vacío: 54,21 mg EAE/g Retenido de la Ultrafiltración: 78,27 mg EAE/g Permeado de la ultrafiltración: 22,70 mg EAE/g Polvo del extracto: 5,94 mg EAE/g Polvo del concentrado: 7,24 mg EAE/g Polvo del retenido ultrafiltrado: 5,40 mg EAE/g Antocianinas Fruta: 2,83 mg EC3G/g Extracción: 8,08 mg EC3G/g Concentración térmica al vacío: 7,80 mg EC3G/g Retenido de la Ultrafiltración: 6,87 mg EC3G/g Permeado de la ultrafiltración: 5,45 mg EC3G/g Polvo del extracto: 0,85 mg EC3G/g Polvo del concentrado: 1,24 mg EC3G/g Polvo del retenido ultrafiltrado: 0,71 mg EC3G/g</p>
Cita	Polifenoles totales	Capacidad antioxidante	Compuestos polifenólicos
Investigaciones que realizaron pruebas <i>in vitro</i> de la mora			
[35] ⁴	<p>Técnica Folin-Ciocalteu Extracto crudo: 22,35 mg EAG/g Extracto rico en polifenoles: 115 mg EAG/g Extracto rico en antocianinas: 277,95 mg EAG/g Extracto rico en proantocianidinas: 546,7 mg EAG/g</p>	<p>Técnica ORAC Extracto crudo: 316,95 µmol TE/g Extracto rico en polifenoles: 3286,25 µmol TE/g Extracto rico en antocianinas: 4596,05 µmol TE/g Extracto rico en proantocianidinas: 4063,75 µmol TE/g</p>	
[36]	<p>Técnica Folin-Ciocalteu Jugo fresco: 45,0 mg EAG/g Jugo microfiltrado: 24,9 mg EAG/g</p>	<p>Técnica IC50 DPPH Jugo fresco: 101,2 µg/ml Jugo microfiltrado: 94,08 µg/ml Técnica ORAC Jugo fresco: 547 µmol ET/g Jugo microfiltrado: 417 µmol ET/g</p>	<p>Técnica HPLC-DAD Antocianinas Jugo fresco: 11,5 mg EC3G/g Jugo microfiltrado: 5,6 mg EC3G/g</p>
[37] ¹		<p>Técnica ORAC 127,74 µmol ET/g</p>	

[39] ^{1,3}			Técnica HPLC-DAD Elagitaninos Microfiltrado: 12,61 mg EAE/g Ultrafiltrado: 21,93 mg EAE/g Antocianinas Microfiltrado: 5,04 mg EC3G/g Ultrafiltrado: 8,77 mg EC3G/g
[42]	Técnica Folin-Ciocalteu Fruta: 37,2 mg EAG/g Pulpa: 29,0 mg EAG/g Jugo microfiltrado: 28,9 mg EAG/g Jugo diafiltrado: 22,9 mg EAG/g		Técnica HPLC-DAD Elagitaninos Fruta: 7,4 mg EAE/g Pulpa: 3,0 mg EAE/g Jugo microfiltrado: 0,4 mg EAE/g Jugo diafiltrado: 0,6 mg EAE/g Antocianinas Fruta: 11,8 mg EC3G/g Pulpa: 11,4 mg EC3G/g Jugo microfiltrado: 8,2 mg EC3G/g Jugo diafiltrado: 8,2 mg EC3G/g
Cita	Polifenoles totales	Capacidad antioxidante	Compuestos polifenólicos
Investigaciones que realizaron pruebas in vivo de la mora			
[44] ^{2,3}			Técnica UPLC-DAD/ESI-Q-TOF/MS Elagitaninos 4,77 mg EAE/g
[45] ^{1,3,5}	Técnica Folin-Ciocalteu 34,03 mg EAG/g	Técnica ORAC 398,53 µmol ET/g	
[46]	Técnica Folin-Ciocalteu 20,85 mg EAG/g	Técnica ORAC 311 µmol ET/g	Técnica Método diferencial de pH Antocianinas 10,51 mg/g
[47] ^{1,3,5}	Técnica Folin-Ciocalteu 63,09 mg EAG/g	Técnica ORAC 325,56 µmol ET/g	Técnica HPLC-DAD Elagitaninos 15,93 mg EAE/g Antocianinas 12,84 mg EC3G/g

ET, equivalentes de Trolox, EAG, equivalente de ácido gálico, EAE, equivalentes de ácido elágico, EC3G, equivalentes de cianidina-3-glucósido.

¹ Los datos reportados se expresaron sobre gramo de peso seco a través de la humedad de la muestra reportada en el artículo.

² Los datos reportados se expresaron sobre gramo de peso seco a través de la humedad reportada por [21] o [39] dependiendo del tipo de jugo utilizado en el artículo.

³ Los datos reportados se transformaron sobre gramo de peso fresco a través de la densidad del jugo, determinada en 1017,63 kg/m³. La densidad del jugo se obtuvo mediante la fórmula $d = \frac{m}{V}$ donde m es la fracción másica de cada componente de la bebida y ρ_i es la densidad de cada componente. La fracción másica de cada componente se determinó con el promedio de los valores reportados de proteínas, grasas, carbohidratos, fibra, cenizas y agua por [18], [22] y [23] en base húmeda. La densidad de cada componente se calculó con las fórmulas de Choi y Okos [51] a 20 °C (temperatura ambiente).

⁴ Los datos reportados se determinaron mediante el promedio de los resultados obtenidos en el artículo.

⁵ Los datos reportados se determinaron con base en el 100% v/v de jugo de mora.

Efecto de una crema elaborada con plantago mayor en un modelo murino de herida aguda de piel

Plantago major based ointment effect in wound healing murine model

Silvia Castro-Piedra¹, Daniela Porras-Jara², Karol Jiménez-Quesada³, Giovanni Garro-Monge⁴

Fecha de recepción: 20 de febrero, 2023

Fecha de aprobación: 12 de junio, 2023

Castro-Piedra, S; Porras-Jara, D; Jiménez-Quesada, K; Garro-Monge, G. Efecto de una crema elaborada con plantago mayor en un modelo murino de herida aguda de piel. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 149-162.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6661>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica, Escuela de Biología. Correo electrónico: scastro@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-0689-8336>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: daniporras400@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2034-9926>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica, Escuela de Biología. Correo electrónico: kjimenez@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-0162-9279>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica, Escuela de Biología. Correo electrónico: ggarro@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7578-1938>

Palabras clave

Callo friable; cultivo celular; formulación; histología; regeneración de piel.

Resumen

Plantago major (llantén), es una planta a la que se le han atribuido propiedades medicinales debido a la diversidad de compuestos que presenta. Está comprobado que extractos crudos de esta especie, pueden ayudar a la regeneración de la piel, estimular la proliferación celular y que tienen actividad antibacterial. Por lo anterior, en la presente investigación se buscó analizar la capacidad regenerativa de diferentes extractos de *P. major* en un modelo *in vitro* e *in vivo*, incluyendo los cultivos celulares de la planta como una alternativa biotecnológica para la producción de metabolitos de interés. Para ello, se establecieron cultivos callogénicos a partir de hojas de plantas *in vitro*, utilizando un medio de cultivo con 50% de sales y vitaminas M&S, suplementado con 2,5 mg/l de TDZ, sacarosa 3% m/v y pH 7. Se probaron distintas concentraciones de diferentes muestras de *P. major* para evaluar cual era el efecto sobre la migración celular *in vitro*. Posteriormente, luego de seleccionar el tratamiento de extracto de campo como el más eficiente *in vitro*, se elaboró una crema a base de esta planta para analizar el efecto durante las diferentes fases de regeneración en piel en un modelo murino. En el caso del modelo de regeneración *in vivo* parece ser que el extracto de *P. major* ejerce una acción antiinflamatoria lo que favorece el incremento en la tasa de regeneración. De esta manera se concluye que la especie *P. major* podría tener un efecto positivo en la fase aguda del proceso de regeneración en piel.

Keywords

Cell culture; callus; histology; pharmaceutical formulation; skin regeneration.

Abstract

Plantago major is a plant that has been attributed medicinal properties due to the diversity of compounds present in it. Crude extracts of this plant have been shown to aid in skin regeneration, stimulate cell proliferation, and exhibit antibacterial activity. This research aims to analyze the regenerative capacity of various extracts of *P. major* in an *in vitro* and *in vivo* model, including plant cell cultures, as biotechnology alternatives to produce metabolites of interest. Callus cultures were established *in vitro* using plant leaves cultured in M&S medium containing 50% salts and vitamins, supplemented with 2.5 mg/l TDZ, 3% m/v sucrose and pH 7. Different concentrations of *P. major* samples were tested to evaluate the *in vitro* cell migration. It was found that field extract treatment was the most efficient. Then, it was used to develop an ointment for analyzing its effect during skin wound healing phases in a murine model. The results of the *in vivo* regeneration model suggest that the *P. major* extract has anti-inflammatory properties which could increase the closure rate. Thus, it is concluded that *P. major* species may be able to a positive effect on the acute phase of the skin wound healing.

Introducción

Durante muchos años, se ha venido investigando alrededor del mundo, los mecanismos de muchas de las plantas utilizadas en la medicina tradicional con el fin de demostrar su efectividad en diversas condiciones de salud [1]. Recientemente la Organización Mundial de la Salud estima que cerca del 80% de la población mundial utiliza plantas medicinales en algunos casos de atención primaria de salud [2].

Una planta que ha sido muy utilizada en diferentes culturas es *Plantago major*. En el caso de esta especie, se le ha atribuido propiedades regenerativas específicamente a las hojas y a las semillas ya que se ha evidenciado que *Plantago major* tiene actividad antiinflamatoria, analgésica, regenerativa, antioxidante e inmunomoduladora en estudios realizados a nivel *in vitro* e *in vivo* [1] [2]. Se considera que estas propiedades son brindadas por el contenido de compuestos bioactivos. A pesar de estos resultados, y que se ha venido estudiando los mecanismos implicados, existen muchas variables que dificultan la reproducibilidad de los resultados como lo son el origen de la planta, la metodología de elaboración del extracto y también la concentración utilizada. Por lo que es necesario estandarizar las condiciones para determinar el efecto biológico sobre las heridas.

Metodología

Establecimiento de cultivos callogénicos: La semilla, requerida para la introducción *in vitro*, fue suministrada por Laboratorios Lisan, a partir de su material de campo con el que cuentan para su Departamento de Investigación y Desarrollo de Procesos. El protocolo de introducción de semilla se apegó al establecido por Garro y Alvarenga en 2009 [7]. Una vez germinadas las semillas *in vitro* se trabajó con cultivo de ápices de acuerdo con el protocolo descrito por estos mismos autores.

A partir de las plántulas de llantén *in vitro* se extrajeron segmentos de hoja joven de 1 cm² para la inducción de calogénesis somática, con el haz en contacto con el medio de cultivo. El medio de inducción de calogénesis, se formuló con una base de sales y vitaminas M&S [8] al 50 %, suplementado con 2,5 mg/l de TDZ, 3% m/v de sacarosa y pH 5,7; este medio de cultivo se denominó como M27.7 50S y corresponde al mismo empleado para el subcultivo del material también. Los explantes fueron colocados a una temperatura de 22°C y en condiciones de oscuridad durante 6 semanas.

Elaboración de extractos crudos y formulación cremosa: La sección de Investigación y Desarrollo de Procesos (I+D) de Laboratorios Lisan S.A. trabajó en el desarrollo de las metodologías de elaboración de extractos y de la formulación cremosa de uso tópico para comprobación de capacidad regenerativa de la planta en estudio. Los extractos hidro-alcohólicos crudos de *P. major*, elaborados por Laboratorios Lisan, se prepararon en una concentración de 10% p/v utilizando etanol al 95%, e incluyeron material de campo colectado a las 8 semanas de su cultivo, plantas *in vitro* de 6 semanas desde su subcultivo y cultivos callogénicos de 6 semanas (desde su 1er subcultivo).

Evaluación de la actividad regenerativa *in vitro* e *in vivo*: Para la prueba de migración y proliferación celular *in vitro*, se sembró una línea celular de fibroblastos murinos 3T3 a una densidad de 10⁴ cél/pozo en placas de 24 pozos y se incubaron con medio DMEM suplementado con 10% de SFB hasta que alcanzaron una confluencia del 80%. En ese momento, se le realizó un rayado en forma de cruz en el centro de cada pozo. Luego, se realizaron lavados con PBS y se agregó DMEM con 5% de SFB como control y, se aplicaron las siguientes concentraciones: 0,02%, 0,04%, 0,06%, 0,08% y 0,1% de cada uno de los extractos de *Plantago major*: de hoja de planta de campo, de hoja de planta *in vitro* y de callo. Para este ensayo, se realizaron 4 repeticiones de cada tratamiento o condición y adicionalmente, se repitió 3 veces. Luego cada pozo fue fotografiado con el fin de observar la migración celular a través de la herida inducida. Este proceso se llevó a cabo hasta que la superficie fue totalmente cubierta. El proceso de captura de imágenes se realizó con un microscopio invertido Olympus CKX31. Luego con el programa de procesamiento de imágenes Image J 1.8 K (National Institutes of Health, USA), se analizó el porcentaje de área cubierta por migración de las células a las 24, 48 y 72 horas con

los diferentes tratamientos. Los datos se analizaron con la prueba estadística ANOVA o bien Kruskal-Wallis, donde $p \leq 0,05$ se consideró como estadísticamente significativo, para esto se utilizó el programa Minitab versión 18 (State College, PA).

Para la evaluación del *P. major* en el proceso de regeneración *in vivo*, se utilizaron 30 ratones de la cepa CD-1. Este experimento contó con la autorización del Comité Institucional de Cuido y Uso de los Animales de la UCR, siguiendo las recomendaciones y los lineamientos correspondientes para la ejecución de los experimentos.

Los ensayos se llevaron a cabo en el Instituto Clodomiro Picado de la Universidad de Costa Rica (UCR). Se trabajó con tres grupos de animales, todas hembras entre 5 y 6 semanas de nacidas de la cepa CD-1. El primer y segundo grupo consistieron de 12 animales cada uno. El tercer grupo, estuvo conformado por 6 animales. El primer grupo se utilizó para aplicar el tratamiento control. Para este, se aplicó el gel con excipiente sobre la lesión. El segundo grupo fue utilizado para aplicar el gel elaborado a partir de un extracto acuoso *Plantago major* (tomado de campo) al 4%. Los individuos del tercer grupo se utilizaron como controles negativos, por lo que no se les aplicó ningún tratamiento. De manera general, a los animales se les indujo anestesia con ketamina (90 mg/kg) y xilacina (10 mg/kg) vía i.p. y se les realizó una herida estandarizada $> 1\text{cm}^2$, eliminando epidermis y dermis. Justo después, se aplicó de forma tópica cada uno de los tratamientos el gel con excipiente, el gel con *P. major* y el control negativo donde no se aplicó nada. Este procedimiento se realizó diariamente durante una semana completa. Tres animales de cada grupo fueron eutanasiados en cámara de CO_2 los días 3, 7, 14 y 28 post-herida, con el fin de analizar el tejido formado en cada una de las fases correspondientes a la regeneración de la piel. Para determinar la tasa de regeneración todos los animales fueron fotografiados todos los días utilizando la misma distancia focal y junto a una regla métrica (usada para la calibración y estandarización del área de la lesión). Las fotos fueron analizadas con el programa Image J y se calculó el porcentaje de regeneración cutánea. Se calculó el porcentaje de cierre con la siguiente fórmula: $((\text{área de herida inicial} - \text{área de herida díaX}) / \text{área inicial}) * 100$. Se aplicaron pruebas de Mann-Whitney haciendo uso de los programas estadísticos IBM®SPSS Statistics® y GraphPad Prism versión 5.00 para Windows. Se reportaron los resultados como las medias \pm el error estándar (SE).

Después de cada eutanasia, se tomó una muestra de la piel de la zona de la herida, incluyendo una parte de la piel sana, y se colocó en una solución de formalina fosfatada a 4°C . El tejido cortó en secciones de 4 o 5 mm de tal forma que abarcara la zona lesionada y los márgenes sanos. Posteriormente las muestras se tiñeron con hematoxilina y eosina para realizar una evaluación microscópica de la estructura de la piel formada. Las imágenes histológicas de las muestras se tomaron usando una cámara Evolution MP (Media Cybernetics, USA) y se analizaron con el programa Image Pro 6.3 (Media Cybernetics, USA). Para determinar el depósito de colágeno, las muestras también se tiñeron con rojo sirio. Se cuantificó el porcentaje del tejido total relacionado con deposición de colágeno (fibrosis) a los 28 días, haciendo uso del programa computacional "ImageJ 1.51K" (National Institutes of Health, USA).

Resultados

Establecimiento de cultivos celulares

En la figura 1 se presentan los resultados obtenidos en la inducción de callogénesis a partir de hoja *in vitro* de *Plantago major*.

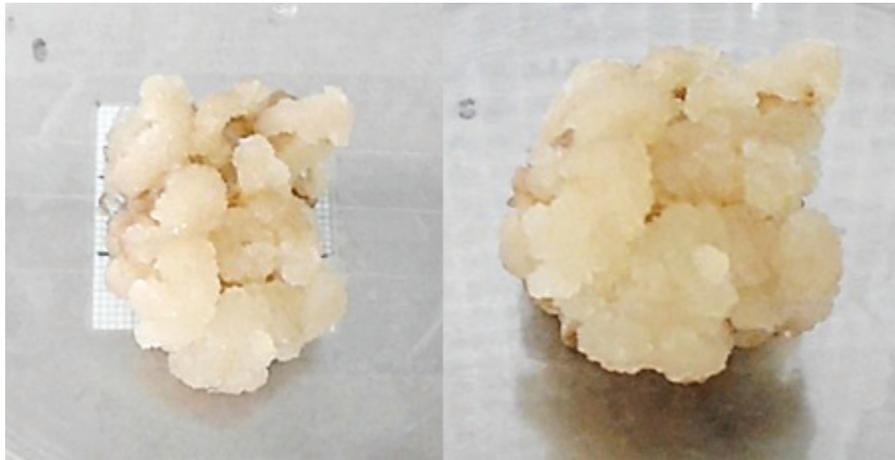


Figura 1. Callo de la línea L19-06 subcultivado en medio M27.7 50S con 6 semanas de crecimiento.

Estimulación de la migración celular *in vitro*

Tal y como se observa en la figura 2, parece que el extracto de callo en bajas concentraciones tiene una actividad biológica importante sobre la migración celular. Por ejemplo, a las 48 y 72 horas, ya se puede observar una diferencia significativa en la migración celular con la concentración de 0,02% cuando se compara con el control. Pero curiosamente, cuando se compara entre todas las concentraciones a las 48 horas, la diferencia en la migración no es significativa ($p > 0,05$, ANOVA). A las 72 horas, se observa que el área no cubierta por células en el control es significativamente mayor en comparación las concentraciones analizadas ($p < 0,05$, Kruskal-Wallis y mediana de Mood). A pesar de estos resultados, en algunos casos se presentó citotoxicidad a partir de la concentración de 0,04%, por lo que se descarta este extracto para realizar los ensayos *in vivo*.

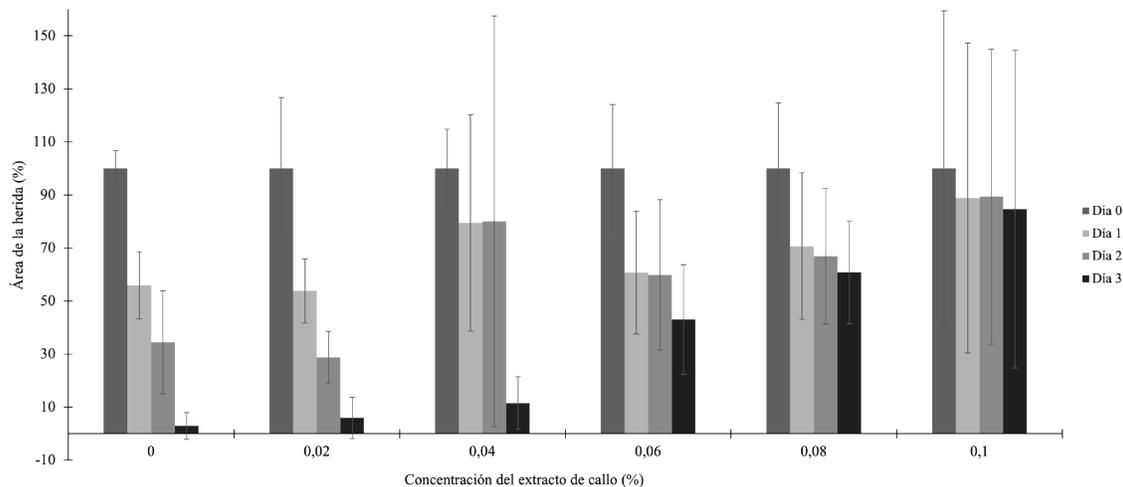


Figura 2. Efecto de un extracto de callo de P. major en diferentes concentraciones sobre la migración celular de fibroblastos murinos durante 24, 48 y 72 horas (Control, 0,02%, 0,06%, 0,08% y 0,1% ANOVA; 0,04% Kruskal Wallis). Las letras que son diferentes entre cada concentración (set de columnas) representan diferencias significativas.

En el caso del extracto de campo (figura 3), se puede afirmar que, a las 24 horas, a pesar de que en el control hubo menor porcentaje de cierre, no hay diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$, ANOVA). Pero, a las 48 horas, se encontró diferencias significativas entre el control y las concentraciones de 0,02%, 0,04%, 0,06% y 0,1%, siendo estas concentraciones más eficientes en estimular la migración celular ($p < 0,05$, ANOVA). A las 72 horas, se encontró diferencia significativa entre 0.02% y el resto de concentraciones analizadas, incluido el control ($p < 0,05$, Kruskal-Walis y prueba mediana de Mood). Lo anterior parece indicar que este extracto presenta alta bioactividad a bajas concentraciones. Sobre todo, porque desde la etapa anterior, es el que ha mostrado más reproducibilidad en los ensayos realizados.

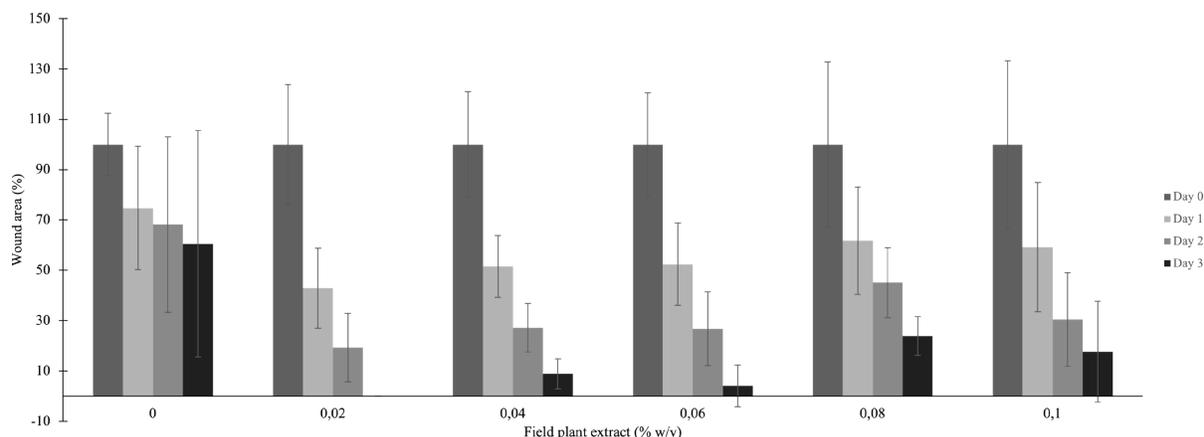


Figura 3. Efecto de un extracto de *P. major* (planta de campo) en diferentes concentraciones sobre la migración celular de fibroblastos murinos durante 24, 48 y 72 horas (ANOVA). Las letras que son diferentes entre cada concentración (set de columnas) representan diferencias significativas.

Finalmente, en el caso del extracto obtenido a partir de las plantas de llantén cultivadas *in vitro* (figura 4), a las 24 y 48 horas, a pesar de que en el control hubo menor porcentaje de cierre, en comparación con las diferentes concentraciones analizadas, no hay diferencias significativas entre cada una de las concentraciones analizadas en comparación con el control ($p > 0,05$, Kruskal-Walis). A las 72 horas, se encontró diferencia significativa entre el control y los diferentes tratamientos. Sin embargo, entre tratamientos, no se encontró diferencias significativas, lo que indica que todas las concentraciones ejercen un efecto similar sobre la migración celular ($p < 0,05$, Kruskal-Walis y prueba mediana de Mood). Aunque se podría considerar que este extracto presenta alta bioactividad en un rango de bajas concentraciones, se descarta para realizar las pruebas *in vivo*, debido a que sus resultados mostraron una gran desviación.

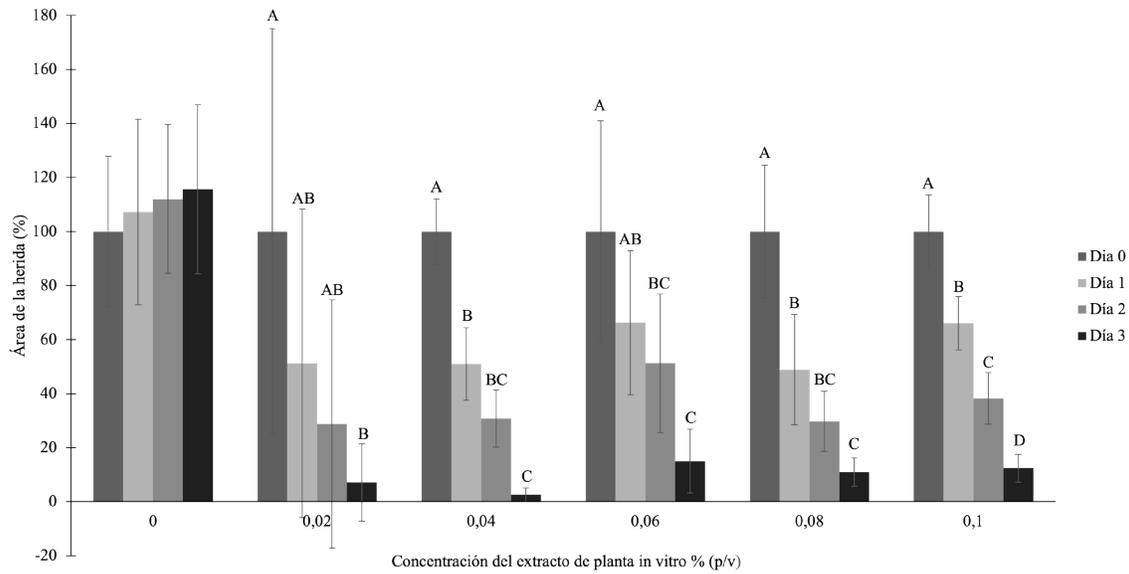


Figura 4. Efecto de un extracto de *P. major* (vitroplanta) en diferentes concentraciones sobre la migración celular de fibroblastos murinos durante 24, 48 y 72 horas. (ANOVA). Las letras que son diferentes entre cada concentración (set de columnas) representan diferencias significativas

Cuando se compara entre todos los tratamientos (extractos y concentraciones), se observa que, a las 24 horas, no hubo diferencias significativas entre las diferentes concentraciones de los 3 extractos, ($p = 0,453$, Kruskal-Walis). A las 48 horas, se encontró que los extractos de planta de campo al 0,02% y 0,04%, así como el extracto de callo al 0,02% y el extracto de planta de *in vitro* al 0,04%, estimula la migración de las células con respecto al resto de los tratamientos ($p = 0,004$, Kruskal Walis y Mediana de Mood). A las 72 horas, se encontró una migración significativamente superior cuando se utilizó el extracto de planta de campo e *in vitro* al 0.02% y 0,04%, lo que de nuevo demuestra que hay un potencial de esta planta a bajas concentraciones.

Efectos de *P. major* sobre la regeneración de la piel

En la figura 5 se puede observar la evolución de las heridas de acuerdo a los tratamientos aplicados durante un seguimiento de 28 días.

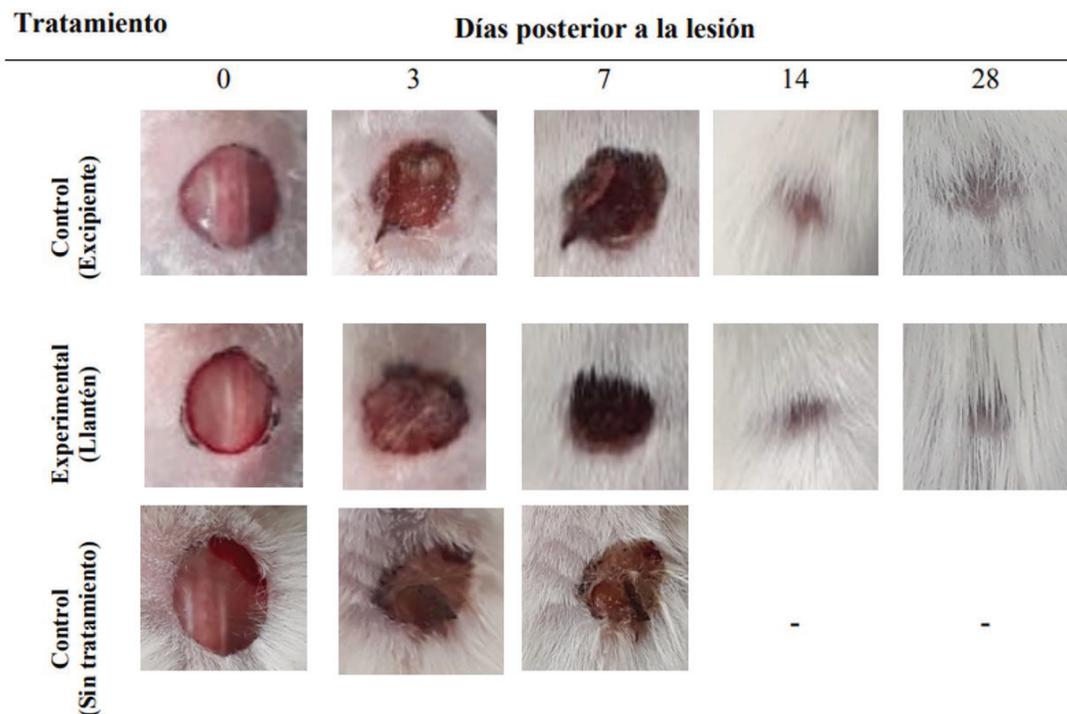


Figura 5. Imagen macroscópica de la evolución del proceso de regeneración de la lesión de los animales de experimentación desde el día 0 hasta el día 28. Se muestra la evolución del proceso para los diferentes tratamientos.

Como se puede apreciar, conforme avanza el tiempo la herida se contrae y cierra de manera progresiva en todos los tratamientos. Se observa que para el día 7 sin importar el tratamiento aplicado, la lesión presentaba un grano o costra, propio de la regeneración de heridas. Para el día 11, ya ninguno de los animales del tratamiento control con excipiente lo presentaban, caso contrario a los animales con el tratamiento experimental. De manera más específica, en la figura 6, se puede observar el porcentaje de cierre promedio calculado para los animales de cada respectivo día y tratamiento.

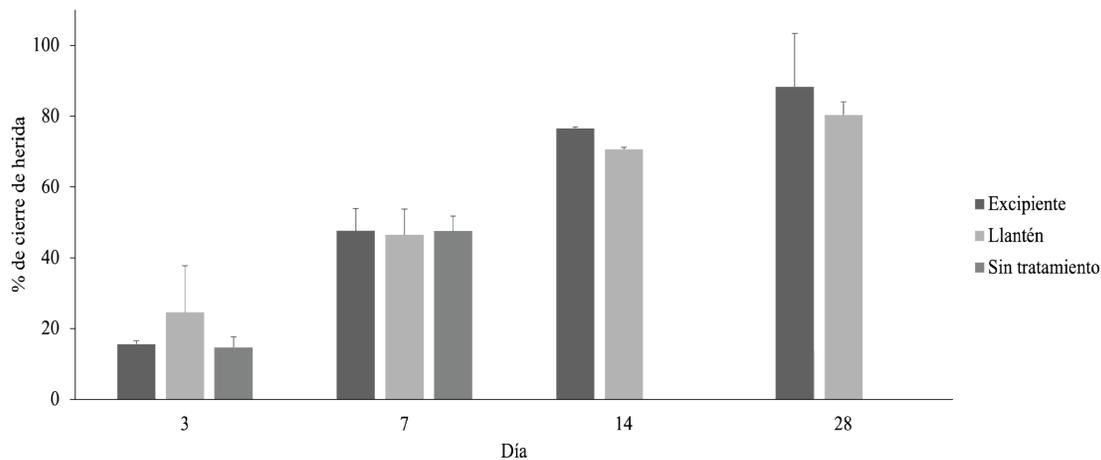


Figura 6. Porcentaje de cierre de la lesión para los animales en estudio.

En la figura 6 se puede observar que el porcentaje de cierre aumenta conforme avanza el tiempo en todos los casos. Además, se pueden apreciar que para el día 3, el porcentaje de cierre es mayor para los animales con el tratamiento experimental, pero, esta diferencia no es significativa (ANOVA Welch, $p= 0,571$). Caso semejante para estos últimos dos sucede en el día 7 (ANOVA, $p= 0,967$) y 28 (T-student, $p =0,419$). Sin embargo, en el día 14 se puede notar que el tratamiento control con excipiente tiene un porcentaje de cierre significativamente mayor que el tratamiento experimental (T-student, $p <0,05$).

Con respecto al conteo de polimorfonucleares, en el cuadro 1 se puede observar la cantidad de PMN/mm² promedio para las muestras de cada tratamiento del día 3.

Cuadro 1. Cantidad de PMN/mm² en la lesión de los animales de los diferentes tratamientos en el día 3.

Tratamiento	PMN/mm ²
Gel + excipiente	2,126,6 ± 117,26
Gel + <i>P. major</i>	1,272,2 ± 167,91*
Sin tratamiento	2 183,3 ± 160,07

Se puede notar que la cantidad de PMN/mm² para los animales tratados con el extracto de *P.major* en el día 3 es significativamente menor que la cantidad presente en los individuos tratados con solo el excipiente y sin aplicar tratamiento ($p <0,05$, Kruskal-Walis). Mientras que entre el tratamiento control con excipiente y el control sin tratamiento, el comportamiento es bastante semejante.

Con respecto al grosor de la epidermis (figura 7), el cambio a través del tiempo en los diferentes tratamientos puede observarse en la figura 7.

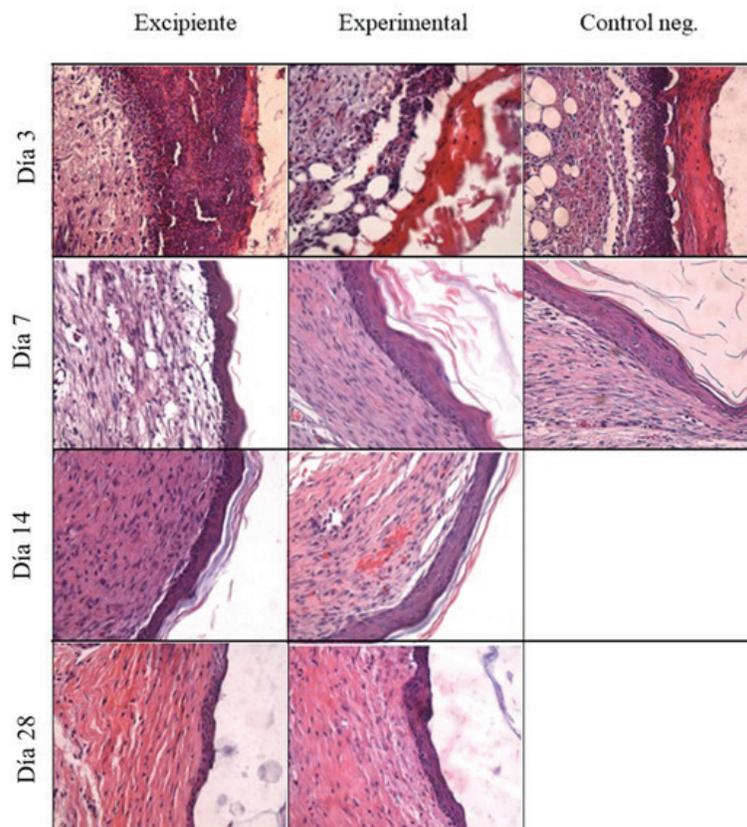


Figura 7. Cortes histológicos de una tinción con HE de muestras de piel de ratón sometidos a diferentes tratamientos. Aumento: 40x.

De manera más cuantitativa, la figura 8 muestra que el día 7 los animales tratados con el extracto de llantén tienen la epidermis menos gruesa de manera significativa (ANOVA, $\rho < 0,05$), comparada con el grupo control excipiente y control sin tratamiento. Para el día 14 no hay diferencia significativa entre los tratamientos (T-student, $\rho = 0,07$) y a los 28 días tampoco (Mann-Whitney, $\rho = 0,306$). El grosor de la epidermis obtenido a los 28 días es significativamente mayor que el grosor de una epidermis sana ($17,3 \mu\text{m}$, Wilcoxon, $\rho < 0,05$).

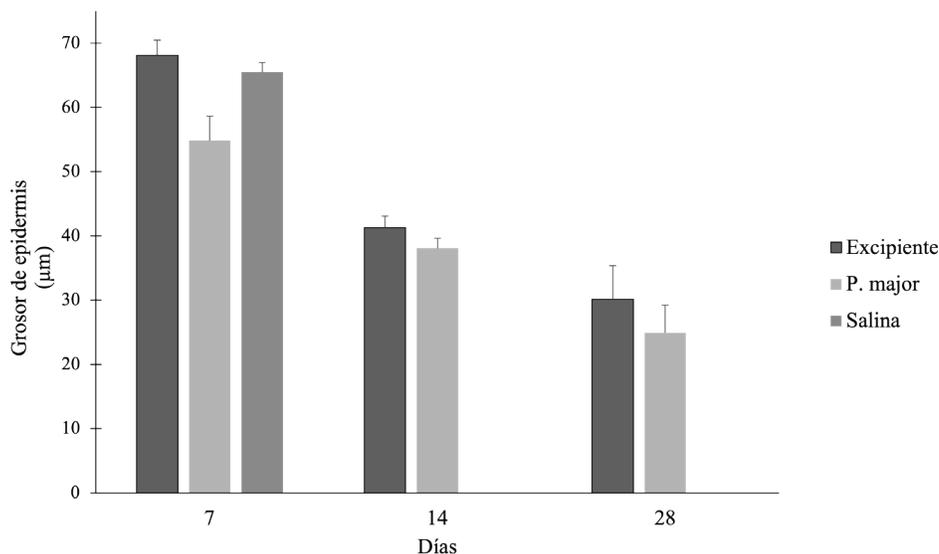


Figura 8. Grosor de la epidermis regenerada bajo los diferentes tratamientos

Se realizó un conteo de vasos sanguíneos presentes en el tejido formado bajo las condiciones de los diferentes tratamientos (figura 9). En este caso, se observa que para el día 7 es donde se contabiliza la mayor cantidad de vasos sanguíneos, lo cual es consecuente para la etapa de regeneración en la que se encuentra, sin embargo, no hay diferencia significativa entre ellos (ANOVA, $\rho = 0,668$). Al día 14 y 28, se observa que aquellos animales tratados con llantén si presentan mayor cantidad de vasos de manera significativa (T-student, $\rho < 0,05$).

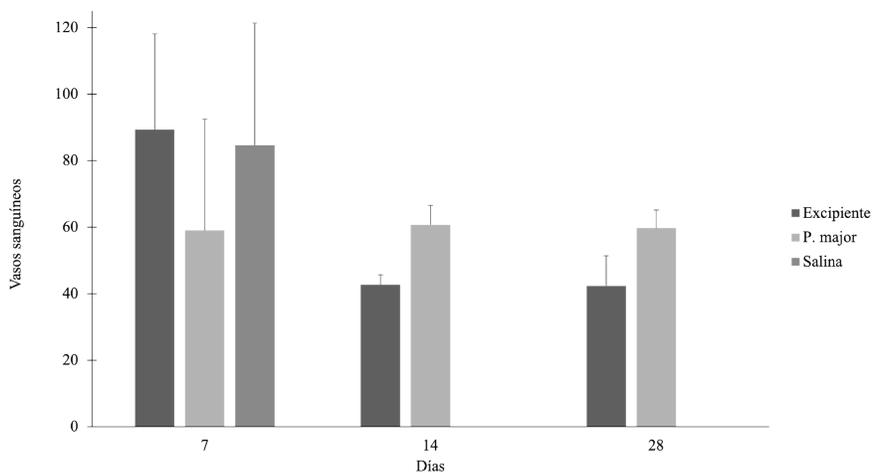


Figura 9. Cantidad de vasos sanguíneos presentes en el tejido regenerado.

Discusión

El uso de plantas medicinales es una práctica que se ha venido haciendo desde hace miles de años en las diferentes culturas. Sin embargo, no siempre se respalda con evidencia científica. Para esta investigación, el medio de cultivo M27.7 50S generó callos friables de llantén a partir de segmentos de hoja de vitroplanta. El momento óptimo de colecta de material celular para su liofilización y elaboración de extractos se encuentra entre la semana 6 y la 8. No se recomienda realizar más de un subcultivo de callos para esta especie, ya que no se logró evitar la oxidación de los mismos en medios con carbón activado, ni mediante el uso de soluciones antioxidantes, en subcultivos posteriores. Callos procedentes incluso de un mismo explante difieren en su morfología y características intrínsecas como color, friabilidad, dureza, tamaño, grado de diferenciación y producción de metabolitos, es entonces cuando las condiciones fisicoquímicas y nutricionales actúan sobre los cultivos callogénicos para orientar la expresión genética de las células a diversos grados de diferenciación, que proporciona a los cultivos características propias y únicas, aun cuando éstos provengan de una misma planta y todavía más, de un mismo explante [9]. Entre los reguladores de crecimiento más usados en cultivos de células vegetales están las auxinas y citocininas [9]. El tidiazurón o TDZ (citocinina), ha sido reportado en diversas publicaciones científicas relacionadas con el cultivo de tejidos vegetales para la inducción de callogénesis a través de la promoción de la proliferación celular [10]. El medio del cultivo M27.7 50S contiene una concentración baja del regulador de crecimiento TDZ (2,5 mg/l), lo evita la exposición prolongada a este compuesto, ya que se conoce que algunos reguladores de crecimiento sintéticos en plantas, puede tener efectos adversos como la variabilidad genética no deseada [11]. Esta investigación contempló el porcentaje de formación de callo, el color y la friabilidad, como parámetros de referencia de la idoneidad del proceso de inducción de callogénesis, siendo los valores óptimos de inducción un 100% de formación de callos amarillo-cremosos y friables [12].

Tal y como se mencionó al inicio, está reportado que extractos de hoja así como de raíz de *P. major* favorece la regeneración de heridas. Estudios *in vitro* han mostrado que esta planta favorece la migración y la proliferación de las células epiteliales y los fibroblastos de la dermis, aspecto clave durante el proceso regenerativo [1][13]. Consistente con lo observado en este estudio, Zubair y colaboradores en 2016, encontraron que una concentración de 0.1 mg/mL presentaba un efecto biológico importante, pero a una concentración de 10 mg/mL mostraba efectos negativos en la proliferación/migración, lo que es también presentado en los resultados. Por su parte, Velasco y colaboradores observaron este mismo efecto en otro tipo de células cuando eran expuestas a extractos hidroalcohólicos de *Plantago major* en dosis de 0,4 y 0,2 mg/mL. A pesar de estos hallazgos *in vitro*, hay que considerar que la regeneración de las heridas es un proceso dinámico que consiste en cuatro fases que se sobreponen: hemostasis, inflamación, proliferación y remodelación y que involucra la participación del sistema inmune, así como del circulatorio, por lo que es necesario analizar este mismo efecto en un organismo vivo [14]. De manera general, dentro de los componentes que se asocian a un efecto en la regeneración están: polisacáridos, lípidos, derivados de ácido cafeico, flavonoides, glicósidos iridoides y terpenoides proveen actividad biomédica en diversos tejidos del organismo pero, el mecanismo preciso por el cual se da las propiedades aún no está del todo claro [1][14].

Tal y como se pudo ver en los resultados, el porcentaje de cierre es mayor para el grupo experimental durante la fase aguda de la regeneración (primeros 7 días). Esto puede deberse a que se ha identificado que en las hojas de *P. major* hay moléculas bioactivas que tienen actividad antiinflamatoria [15]. Dicha propiedad, acorde Adom et al. (2017) puede deberse a la presencia de glucósidos iridoides como la aucubina y los flavonoides como la baicaleína y la hispidulina [16]. Sin embargo, a partir del día 7 hasta el 28 se observa que la ventaja que tenía el porcentaje de cierre sobre los otros dos grupos ya no está presente. Esto pudo

haberse debido a que solamente durante los primeros 7 días se aplicó el extracto y que era necesario aplicarlo durante todos los 28 días o bien era necesario incrementar la concentración del extracto. También, Ashkani et al, 2019 aplicaron extractos hidroalcolólicos al 5% en carboximetilcelulosa sobre una lesión inducida en ratas Sprague Dawley y probaron que estos extractos generaron un efecto antiinflamatorio e incrementaron el colágeno, vascularización y la proliferación de fibroblastos [5]. Por otro lado, en otros ensayos se han utilizado concentraciones considerablemente mayores de *P. major*, las cuales van en un rango de concentración desde un 20% como mínimo hasta un 50% como máximo donde se han obtenido diferencias significativas en comparación con los controles [17][18][19][20][21]. El conteo de PMN se realizó solo para las muestras colectadas el día 3 debido a que para ese momento es cuando se espera el infiltrado de PMN, en la fase de inflamación. La presencia de una menor cantidad de PMN/mm² en las áreas analizadas sugiere que el tratamiento experimental tiene un efecto sobre el infiltrado inflamatorio. Nuevamente se hace una atribución a los compuestos con actividad antiinflamatoria que se ha reportado se encuentran presentes en las hojas de *P. major* como el posible motivo de un menor infiltrado inflamatorio [1][16]. Las medidas de la epidermis se realizaron a partir del día 7 debido a que para ese momento ya se puede evidenciar la presencia de esta capa. En todos los grupos fue posible observar la reepitelialización en día 7, lo que indica el inicio de la etapa proliferativa de la regeneración [22] Conforme avanza el tiempo, la epidermis se vuelve más delgada, lo cual es lo esperado ya que en la fase proliferativa el tejido se contrae de manera más pronunciada y la epidermis se reestructura de tal manera que pierde su grosor [23]. Para el día 7, puede notarse que el grosor de la epidermis de los animales tratados con el extracto de *P. major* es más delgada, lo que puede deberse al efecto de los compuestos bioactivos cuya acción deriva en una aceleración del proceso de regeneración y el incremento de la proliferación de los fibroblastos, actividad atribuida a los taninos [20]. Sin embargo, cuando se llega al día 14 no se observan diferencias en el grosor de la epidermis de los grupos en estudio. Lo anterior sugiere que probablemente, era necesario continuar la aplicación del gel/crema con el extracto durante más tiempo o bien, incrementar la concentración. La misma situación ocurre para el día 28, donde ya se encuentra el tejido en la etapa de maduración / remodelación [24] donde no se observan diferencias significativas entre los grupos en estudio. Por otro lado, el conteo de vasos sanguíneos se realizó a partir del día 7 debido a que como el tejido se encuentra en fase proliferativa es a partir de este momento que se da la angiogénesis, es decir, la formación de vasos sanguíneos [25]. En el día 14 y 28, parece la vascularización es significativamente superior en el grupo experimental. Sin embargo, es necesario buscar otro método de conteo para los futuros ensayos, donde se utilice un marcador específico para ser detectado por inmunohistoquímica y utilizar un sistema de conteo automatizado. A pesar de ello, parece indicar que hay posibilidad de que sus compuestos ayuden al proceso de angiogénesis en la regeneración tisular. De manera general, los efectos favorecedores en el proceso de regeneración de la piel al usar el extracto de *P. major* se observan principalmente en las primeras etapas del proceso, esto podría deberse a varias causas; primero, la concentración usada del extracto, de acuerdo a lo reportada en otros estudios, podría considerarse estudiar diferentes concentraciones, además de aplicar por más días el tratamiento tópico.

Conclusiones

Los efectos benéficos en el proceso de regeneración de la piel al usar el extracto de *P. major* se observan principalmente en las primeras etapas del proceso, y se sugiere continuar la aplicación del gel/crema con el extracto durante más tiempo o bien, incrementar la concentración.

Fue posible además observar que la vascularización es significativamente superior en el grupo experimental, indicando con ello que hay posibilidad de que los compuestos de llantén, ayuden al proceso de angiogénesis en la regeneración tisular.

Agradecimientos

A la empresa Laboratorios Lisan S.A y su personal, que a través de su sección de Investigación y Desarrollo de Procesos (I+D), contribuyó al desarrollo de este proyecto, con ejecución de actividades concretas para el alcance de los objetivos, así como mediante apoyo financiero.

A la Dra. Marietta Flores y Dr. Alberto Alape del Instituto Clodomiro Picado (UCR) por su colaboración en el estudio del efecto de la regeneración en piel del modelo murino

Referencias

- [1] M. Zubair, H. Nybom, C. Lindhol, J. Brandner y K. Rumpunen, «Promotion of wound healing by *Plantago major* L. leaf extracts-*ex-vivo* experiments confirm experiences from traditional medicine.,» *Natural products resear-chs*, vol. 30, n° 5, pp. 622-624, 2016.
- [2] M. Alam, «The National Institute of Health and Family Welfare,» *Zahid*, 20 May 2016. [En línea]. Available: https://www.nhp.gov.in/introduction-and-importance-of-medicinal-plants-and-herbs_mtl. [Último acceso: 16 May 2021].
- [3] B. Abd, H. Hasan y M. Murtadha, «Study of antibacterial activity of *Plantago major* and *Ceratonia siliqua*,» *The Iraqi Postgraduate Medical Journal*, vol. 11, n° 1, pp. 130-135, 2021.
- [4] U. Harput, Y. Genc y I. Saracoglu, «Cytotoxic and antioxidative activities of *Plantago lagopus* L. and characterization of its bioactive compounds,» *Food and Chemical Toxicology*, n° 50, pp. 1554-1559, 2012.
- [5] F. Fons, D. Tusch, S. Rapior, A. Gueiffier, J. Roussel, A. Gargadennec y C. Andary, «Phenolic profiles of untransformed and hairy root cultures of *Plantago lanceolata*,» *Plant Physiology Biochemistry*, vol. 37, n° 4, pp. 291-296, 1999.
- [6] Z. Ru, L. Mao y J. Zheng, «*Rehmannia glutinosa*: Review of botany chemistry and pharmacology,» *Journal of Ethnopharmacology*, vol. 117, pp. 199-214, 2008.
- [7] G. Garro y S. Alvarenga, «Un protocolo para el cultivo *in vitro* y la micropropagación masiva de llantén (*Plantago major*),» *Tecnología en Marcha*, vol. 22, n° 3, pp. 25-33, 2009.
- [8] T. Murashige, y F. Skoog, «A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures,» *Physiologia plantarum*, vol 15, n°3, pp. 473-497, 1962.
- [9] G. Calva y J. Pérez, «Cultivo de células y tejidos vegetales: fuente de alimentos para el future,» *Revista Digital Universitaria*, vol. 6, n°11, pp. 1-16, 2005.
- [10] T. Pérez, «Multiplicación *in vitro* de brotes de guayaba (*Psidium guajava* L.) var. Enana Roja Cubana EEA 18-40 obtenidos a partir de semillas,» *Cultivos Tropicales*, vol. 23, n° 3, pp. 57-61, 2013
- [11] M. Danaee, R. Farzinebrahimi, M. Kadir, U. Sinniah, R. Mohamad y R. Taha, «Effects of MeJA and SA elicitation on secondary metabolic activity, antioxidant content and callogenesis in *Phyllanthus pulcher*,» *Braz. J. Bot*, DOI10.1007/s40415-015-0140-3, 2015.
- [12] R. Chitra, K. Rajamani y E. Vadivel, «Regeneration of plantlets from leaf and internode explants of *Phyllanthus amarus* Schum. and Thonn,» *African Journal of Biotechnology*, vol. 8, n° 10, pp. 2209-2211, 2009.
- [13] R. Velasco, R. Tapia, R. Roman, E. Vega y M. Perez, «Effect of *Plantago major* on cell proliferation *in vitro*,» *J Ethnopharmacology*, vol. 103, pp. 36-42, 2006.
- [14] S. Ashkani, M. Khoshneviszadeh, A. Noorafshan, R. Miri, S. Rafiee, K. Hemyari, S. Kardeh, O. Koohi, D. Fani y E. Faridi, «The Healing Effect of *Plantago Major* and *Aloe Vera* Mixture in Excisional Full Thickness Skin Wounds: Stereological Study,» *World J Plast Surg*, vol. 8, n° 1, pp. 51-57, 2019.
- [15] M. Zubair, H. Nybom, C. Lindholm y K. Pumpunen, «Major polyphenols in aerial organs of greater plantain (*Plantago major* L.) and effects of drying temperature on polyphenol contents in the leaves,» *Scientia Horticulturæ*, vol. 128, pp. 523-529, 2011.
- [16] M. Adom, M. Taher, D. Mutalabisin, M. Amri, M. Abdul, M. Wan, P. Sengupta y D. Susanti, «Chemical constituents and medical benefits of *Plantago major*,» *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 96, pp. 348-360, 2017.

- [17] M. Amini, M. Kherad, D. Mehrabani, N. Azarpira, M. Panjehshahin y N. Tanideh, «Effect of *Plantago major* on burn wound healing in rat.,» *Journal of Applied Animal Research*, vol. 37, n° 1, pp. 53-56, 2010.
- [18] N. Moradi, F. Shafie, M. Moeni, S. Kashfi, M. Rashidipour, F. Chehelcheraghi, S. Ali y B. Rasoulia, «The Wound Healing Effect of *Plantago major* Leaf Extract in a Rat Model: An Experimental Confirmation of a Traditional Belief in Persian Medicine,» *Herbal Medicines Journal*, vol. 3, n° 1, pp. 26-30, 2018.
- [19] K. Reyes, «Elaboración de una crema cicatrizante a base de romero (*Rosmarinus officinalis*) y llantén (*Plantago major*).,» *Tesis de grado para la obtención de título de Bioquímica Farmacéutica. Universidad Técnica de Machala.*, 2014.
- [20] D. Rondo, «Eficacia de *Plantago major* "llantén" en cicatrización y calidad de cicatriz en quemadura comparado con alantoína en *Rattus rattus*.,» *Tesis para obtener el título profesional de Médico Cirujano. Universidad César Vallejo.*, 2019.
- [21] P. Yambay, «Elaboración y control de calidad de una crema a base de extractos hidroalcohólicos de berro (*Nasturtium officinalis*) y llantén (*Plantago major*) y comprobación de su actividad cicatrizante en heridas inducidas en ratones,» *Tesis de grado para la obtención de título de Bioquímica Farmacéutica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2013..
- [22] E. Gantwerker y D. Hom, «Skin: Histology and Physiology of Wound Healing.,» *Clinics in Plastic Surgery.*, vol. 39, n° 1, pp. 85-97, 2012.
- [23] O. González, T. Costa , Z. Andrade y A. Medrado, «Wound healing - A literature review,» *Anais Brasileiros de Dermatologia*, vol. 91, n° 5, pp. 614-620, 2016.
- [24] H. Wallace y P. Zito, «Wound Healing Phases., » *NCBI Bookshelf*, 2019.
- [25] G. Schultz, G. Chin, L. Moldawer y R. Diegelmann, «Principles of wound healing. Mechanisms of Vascular Disease: A Reference Book for Vascular Specialists, » *Adelaide: University of Adelaide Press*, 2011.

Análisis comparativo de rentabilidad del cultivo de chile dulce variedad Natalie de dos invernaderos de horticultura protegida de la Región Huetar Norte

Comparative analysis of the profitability
of the cultivation of sweet pepper variety
Natalie from two protected horticulture
greenhouses in the Huetar Norte Region

Alfredo Alfaro-Ramos¹

Fecha de recepción: 6 de febrero, 2023
Fecha de aprobación: 11 de mayo, 2023

Alfaro-Ramos, A. Análisis comparativo de rentabilidad del cultivo de chile dulce variedad natalie de dos invernaderos de horticultura protegida de la región huetar norte. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 163-171.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6377>

¹ Escuela de Administración de Empresas, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede San Carlos. Correo electrónico: aafaro@itcr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-4145-4896>

Palabras clave

Costos de producción; ingresos; punto de equilibrio; utilidad bruta; chile dulce variedad Natalie; invernadero.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue comparar el proceso de sus costos de producción y su estado de pérdidas y ganancias de dos productores de chile dulce del proyecto de extensión Red de Horticultura de la Región Huetar Norte. Se evaluó la rentabilidad y el punto de equilibrio de dos invernaderos que formaron parte de un proyecto de extensión Red de Horticultura Protegida Región Huetar Norte, los resultados demostraron que el invernadero de Cinchona tiene un precio promedio más bajo que el invernadero de San Francisco, casi un 72% menos, los costos totales de producción del invernadero de San Francisco son el doble que el invernadero de Cinchona. A pesar de que San Francisco tiene un mejor precio, pero por tener mayores costos de producción es mucho menos rentable que Cinchona (21% vs 42%). En los gráficos ya se podía ver que San Francisco tenía un mayor peso en los costos por el lado de la materia prima, por eso en la asesoría que se les dio, se les hablo de la importancia de buscar otros insumos con menores precios y a Cinchona se le recomendó subir sus precios. Se le recomendó al invernadero de San Francisco que trate de bajar los costos de producción, buscando otros insumos u otros proveedores de los insumos. Se le recomendó a Cinchona buscar otros clientes y tratar de buscar mejores precios para poder obtener una mejor rentabilidad.

Keywords

Production costs; income; breakeven point; gross profit; Natalie variety sweet pepper; greenhouse.

Abstract

The objective of this work was to compare the process of its production costs and its profit and loss statement of two sweet pepper producers of the Horticulture Network extension project of the North Huetar Region. The profitability and breakeven point of two greenhouses that were part of an extension project Protected Horticulture Network Huetar Norte Region were evaluated, the results showed that the Cinchona greenhouse has a lower average price than the San Francisco greenhouse, almost 72% less, the total production costs of the San Francisco greenhouse are double that of the Cinchona greenhouse. Although San Francisco has a better price, but because it has higher production costs, it is much less profitable than Cinchona (21% vs. 42%). In the graphs it was already possible to see that San Francisco had a greater weight in the costs on the raw material side, that is why in the advice they were given, they were told about the importance of looking for other supplies with lower prices and to Cinchona he was advised to raise his prices. The San Francisco greenhouse was recommended to try to lower production costs by seeking other inputs or other input suppliers. Cinchona was advised to look for other clients and try to find better prices in order to obtain better profitability.

Introducción

En Costa Rica hay regiones con potencial para la producción de hortalizas bajo ambientes protegidos como la Región Huetar Norte, y una parte que nos trae para comunicar en esta oportunidad es el tema de los costos de producción bajo ambientes protegidos, los siguientes autores hacen referencia al comportamiento agronómico del cultivo protegido de chile dulce,

tomate y melón, así como la investigación de las ventajas de aplicar la horticultura protegida en la Zona Norte. Además, muestra que al utilizar la Horticultura Protegida permite la reducción de costos de insumos y materias primas obteniendo mayor beneficio [1].

En un trabajo de tesis dirigido a 10 familias guatemaltecas cuya forma de subsistencia es la agricultura; por ello se implementó el cultivo de tomate bajo invernadero con una extensión aproximada de 200 metros cada uno. Al analizar dicho proyecto las familias obtuvieron grandes beneficios económicos, así como la obtención de conocimientos para la generación de ingresos [2].

El siguiente autor destaca la necesidad de buscar alternativas sostenibles de carácter técnico y financiero que permitan adaptarse al crecimiento poblacional y a la necesidad alimentaria en México, mediante la identificación de éxito. Por ello, él hace énfasis en las oportunidades de negocios de la agricultura protegida en el ámbito nacional e internacional, la cual brinda beneficios nutricionales a la población y fomento del Emprendedurismo, por medio del apoyo y servicios que impulsen nuevos negocios [3].

Un estudio del MAG hace una relación con el cultivo de chile en varias zonas de Costa Rica, resaltando factores que inhiben en dicho cultivo, como la ubicación, el clima, los insumos, materias primas y mano de obra, así como los costos de producción de este cultivo en invernadero de diferentes tamaños [4].

Consideraciones de costos y mercado incentivan el sistema de invernadero, así como otros que buscan el desarrollo de la horticultura protegida. Ante los bajos precios en el mercado de algunos productos estacionales una cosecha controlada reduce el riesgo de pérdidas y permite un abastecimiento constante durante el año. El uso de invernaderos alarga el periodo de cosecha de las hortalizas y constituye una estrategia de mercado que permita ofertar el producto en diferentes épocas del año [5].

Todo proyecto productivo agrícola necesita ser valorado desde el punto de vista económico, estimando la inversión, el cálculo de los costos, los ingresos y la utilidad esperada. Analizar los costos de producción de ocho productos hortícolas, tanto en condiciones de invernadero como de campo abierto [6].

La agricultura por su naturaleza está asociada al riesgo, de ahí que este sistema de Horticultura Protegida tenga como característica básica la protección contra los riesgos inherentes a esta actividad. Los riesgos pueden ser: climatológicos, económicos (rentabilidad, mercado) o de limitaciones de recursos productivos (agua o de superficie) [7].

Los invernaderos junto con el control climático permiten optimizar la productividad del sistema de cultivo, facilitar la programación de las cosechas, optimizar la calidad de los productos y minimizar la incidencia de plagas y enfermedades. En un invernadero con tecnología media, los mayores costos variables de producción son los correspondientes a la mano de obra y fertirriego. En general la producción en invernadero es más rentable a medida que se incrementa la superficie [8].

El siguiente autor describe como los insumos o materiales que se utilizan de forma directa en el proceso de producción y que se convierten en costos, por ello es necesario que la empresa establezca un control de eficiencia sobre esta materia. Materia prima directa como los insumos y nutrientes, gastos indirectos de producción como las bolsas y el transporte de los productos [9].

Y también el mismo autor define la mano de obra la remuneración en dinero o en especie que se da al personal que labora en la planta productora. Se divide en mano obra directa, es la remuneración que se ofrece en dinero o en especie al personal que efectivamente ejerce un

esfuerzo físico dentro del proceso de transformar el insumo en un producto final; y mano obra indirecta, es la remuneración del personal que, laborando en la planta productora, no interviene directamente dentro de la transformación de la materia prima en un producto final [9].

El objetivo de este trabajo fue comparar el proceso de sus costos de producción y su estado de pérdidas y ganancias de dos productores de chile dulce del proyecto de extensión Red de Horticultura de la Región Huetar Norte.

Materiales y métodos

La metodología consistió en comparar la contabilidad de dos proyectos miembros del proyecto de extensión Red de Horticultura Protegida Región Huetar Norte, fueron a estos dos proyectos: Asociación de mujeres Amonci de Nueva Cinchona, ubicados territorialmente en Nueva Cinchona, Escuela San Francisco de Peñas Blancas, ubicado territorialmente en la comunidad del Burrito pertenecientes a San Francisco de Peñas Blancas. Se utilizó un software en Excel que utilizamos exclusivamente para que los miembros de la Red lo aprendieran a usar, para ingresar los insumos, la mano de obra, la cosecha, registrar las ventas, y el mismo sistema se encarga de calcular los costos de producción, las utilidades y/o perdidas, calcular el punto de equilibrio.

La evaluación se hizo dentro de un ciclo de producción (6 meses en el caso del chile dulce), este periodo comprendió del 22 de enero del 2019 al 22 de julio del 2019. Para poder calcular el estado de pérdidas y ganancias las empresas tienen los ingresos que están compuesto por el precio de los productos y la cantidad de productos vendidos, los costos que sería los costos de la mano de obra, insumos y gastos indirectos de producción [10]. Para poder calcular los costos de producción se debe de calcular el costo de la mano de obra, cálculo de los insumos, agua, electricidad, nutrientes [11].

Es importante recalcar que el precio del chile dulce lo determina el mercado, teniendo los picos de los precios más altos en diciembre por el aumento de la demanda por los tamales. Los insumos varían de acuerdo a los cultivos, en este caso en específico los insumos estarán compuesto por las semillas que es un insumo agroforestal, por los fertilizantes que son soluciones químicas que son nutrientes de las plantas, por los fitosanitarios que son los controladores de plagas y hongos, el costo de la mano de obra, el costo del agua, la electricidad, ya que los invernaderos funcionan con un sistema de riego tecnificado.

En el proyecto de extensión desarrollamos un software en Excel que permitía a los productores hortícolas ingresar los datos de los insumos, la mano de obra, llevar un registro de las cosechas, las ventas, es importante recalcar que en proceso del proyecto de extensión se les enseñó a usar este software a los productores de la Red de Horticultura Región Huetar Norte.

Resultados y discusión

En el análisis realizado a los dos proyectos hortícolas parte del proyecto de extensión: Red de Horticultura Protegida Región Huetar Norte fueron a estos proyectos: Asociación de mujeres Amonci de Nueva Cinchona, ubicados territorialmente en Nueva Cinchona, Escuela San Francisco de Peñas Blancas, ubicado territorialmente en la comunidad del Burrito pertenecientes a San Francisco de Peñas Blancas, el primero el análisis se hizo a un invernadero con 200 plantas de chile dulce variedad Natalie y al segundo se hizo a un invernadero con 240 plantas sembradas de la misma variedad del primero, fueron los escogido por tener diferentes climas y similares cantidades de plantas sembradas.

En el invernadero de Cinchona encontramos la composición de su mano de obra que es un costo variable un 44,13 % de su costo de producción, los insumos que son otro costo variable representan un 21,23% de su costo de producción, y la depreciación que es un costo fijo representa un 34,64% del total del costo de producción, ver cuadro 1.

Cuadro 1. Componentes de los costos de producción en Cinchona.

Mano de obra costos variables	44,13%
insumos costos variables	21,23%
Depreciación costos fijos ²	34,64%
Total	100,00%

Fuente: Elaboración propia con base a datos contables del invernadero.

En los costos de la mano de obra, el proceso de la mano de obra que tiene un mayor impacto en los costos de la mano de obra es el proceso de lavar, desinfectar y preparar el invernadero, esto representó un 10,86% del total de la mano de obra. Los insumos que más impacto han tenido en el costo total de los insumos es el nitrato de potasio con un 7,05% del total del costo de los insumos y el sulfato de magnesio con un 6,67% del total del costo de los insumos.

En el invernadero de San Francisco de Peñas Blancas encontramos la composición de su mano de obra que es un costo variable un 34,70 % de su costo de producción, los insumos que son otro costo variable representan un 43,81% de su costo de producción, y la depreciación que es un costo fijo representa un 21,76% del total del costo de producción, ver cuadro 2.

Cuadro 2 Componentes de los costos de producción en San Francisco.

Mano de obra costos variables	34,70%
Insumos costos variables	43,81%
Depreciación costos fijos	21,76%
Total	100,00%

Fuente: Elaboración propia con base a datos contables del invernadero.

En los costos de la mano de obra, el proceso de la mano de obra que tiene un mayor impacto en los costos de la mano de obra es el proceso de amarrar el chile, esto representó un 21,99% del total de la mano de obra. Los insumos que más impacto han tenido en el costo total de los insumos es el Biocto con un 21,46% del total del costo de los insumos y el microplex con un 11,08% del total del costo de los insumos.

Según Alas [5] en diferentes cultivos de hortalizas encontró que en un invernadero rustico el porcentaje de la mano de obra representó un 57% del costo total y la materia prima representó un 43%. En un invernadero semitecnificado el porcentaje de la mano de obra significó un 51% y la materia prima un 49%. En cambio, en un invernadero tecnificado el porcentaje de la mano de obra bajó a un 40% y los insumos un 60%.

2 El cálculo de la depreciación para ambos invernaderos se tomó el método de línea recta sin valor de rescate para una vida útil de 5 años según el Ministerio de Hacienda.

De Acuerdo a Martínez [9] en un cultivo de chile bajo invernadero encontró que el porcentaje del costo de la mano de obra fue de un 72% y la materia prima un 28%.

En el caso específico del invernadero tecnificado como los nuestros, el costo de la mano de obra no es tan relevante como en los otros tipos como el invernadero rustico, en el caso nuestro el costo de la mano de obra de Cinchona fue de 44,13 % y el de Peñas Blancas el costo de la mano de obra fue de 34,70% comparado con un 57% en un invernadero rustico y un 51% en un invernadero semirústico, en cambio en un invernadero tecnificado el costo de la mano de obra bajó a un 40%, muy similar a los nuestros.

A continuación, para poder realizar el análisis comparativo de ingresos vs los costos presentamos el precio de mercado del chile dulce en un periodo de análisis de enero a julio del año 2019, primer presentamos los precios de cada mes, luego le sacamos un precio promedio para poder comparar con los precios que se cobraron en promedio en los 2 invernaderos en el ciclo seleccionado. Ver cuadro 3.

Cuadro 3. Precio de mercado del chile dulce variedad Natalie de enero a julio del 2019.

Año	2019
Enero	₡160,00
Febrero	₡150,00
Marzo	₡250,00
Abril	₡250,00
Mayo	₡210,00
Junio	₡180,00
Julio	₡300,00
Precio promedio	₡214,29

Fuente: CNP, 2023

Siguiendo con el análisis comparativo realizamos este cuadro para medir la rentabilidad, a continuación, le presentamos el cuadro 4. En este cuadro resumen ya presentamos los precios que cobró cada invernadero en promedio, la suma de los gastos totales (mano de obra, insumos y depreciación), la utilidad bruta, utilidad por unidad, precio de venta por unidad.

Cuadro 4. Análisis comparativos sobre la rentabilidad entre los invernaderos escogidos.

Comparación de un ciclo de producción de seis meses	Ingresos por ventas durante el ciclo	Costos totales durante el ciclo	Utilidad bruta nominal	Utilidad bruta expresada en porcentajes	Precio de venta promedio	Costo unitario promedio	utilidad por unidad
Cinchona	₡952 650,00	₡553 084,00	₡399 566,00	42%	₡63,00	₡36,64	₡26,00
San Francisco de Peñas Blancas	₡1 390 720,00	₡1 102 048,00	₡288 672,00	21%	₡221,00	₡175,31	₡46,00

Fuente: Elaboración propia con base a información contable de cada invernadero.

Según el cuadro 4 se puede determinar que el invernadero de Cinchona tiene un precio promedio más bajo que el invernadero de San Francisco, casi un 72% menos, los costos totales de producción del invernadero de San Francisco son el doble que el invernadero de Cinchona. A pesar de que San Francisco tiene un mejor precio, pero por tener mayores costos de producción es mucho menos rentable que Cinchona (21% vs 42%). En los gráficos ya se podía ver que San Francisco tenía un mayor peso en los costos por el lado de la materia prima, por eso en la asesoría que se les dio, se les hablo de la importancia de buscar otros insumos con menores precios.

El punto de equilibrio lo define Gitman [10] cuando los ingresos totales son iguales a los costos totales y no hay ni pérdida ni ganancia, después del punto de equilibrio ya la empresa comienza a tener ganancias.

A continuación, vamos a ver el punto de equilibrio del invernadero de Cinchona para la producción de chile dulce, es importante recalcar que los invernaderos también producen tomate y lechuga, pero para efectos de este análisis solamente tomamos en consideración el chile dulce variedad Natalie.

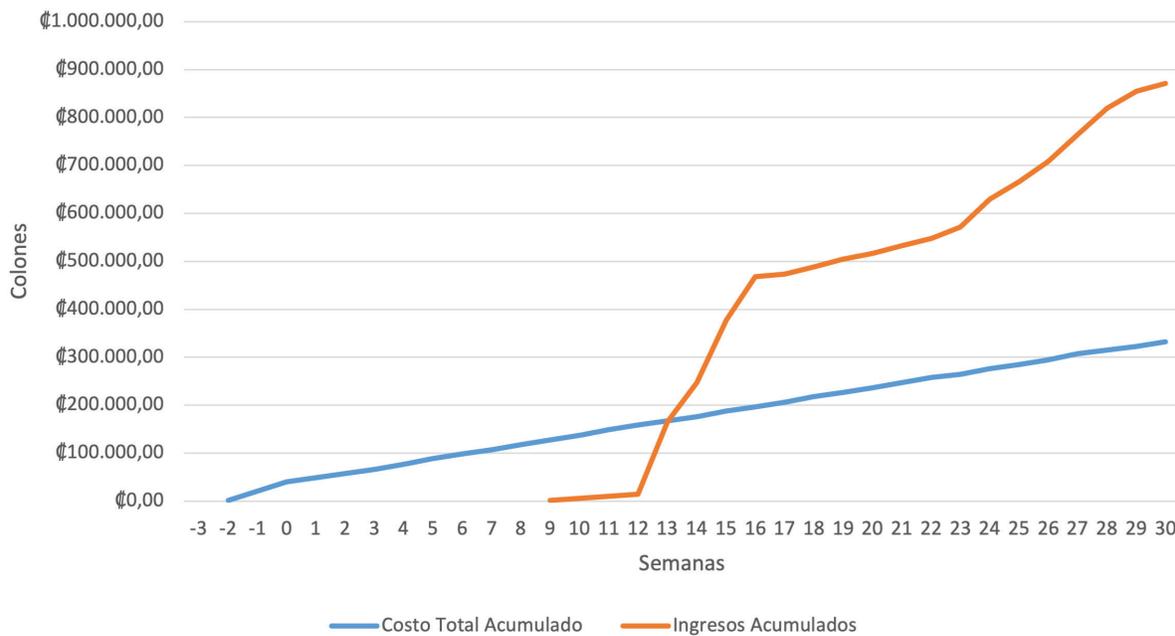


Figura 1. Punto de equilibrio del invernadero de Cinchona.

En la figura 1 se puede analizar que la empresa obtiene su punto de equilibrio en la semana 13, es ahí donde los ingresos son iguales a los costos de producción, como se puede ver en el grafico la empresa siguió explotando el cultivo hasta la semana 30 (7 meses) ya después de la semana 30 los ingresos comenzaron a ser decrecientes, por eso se termina la producción de ese ciclo en ese periodo.

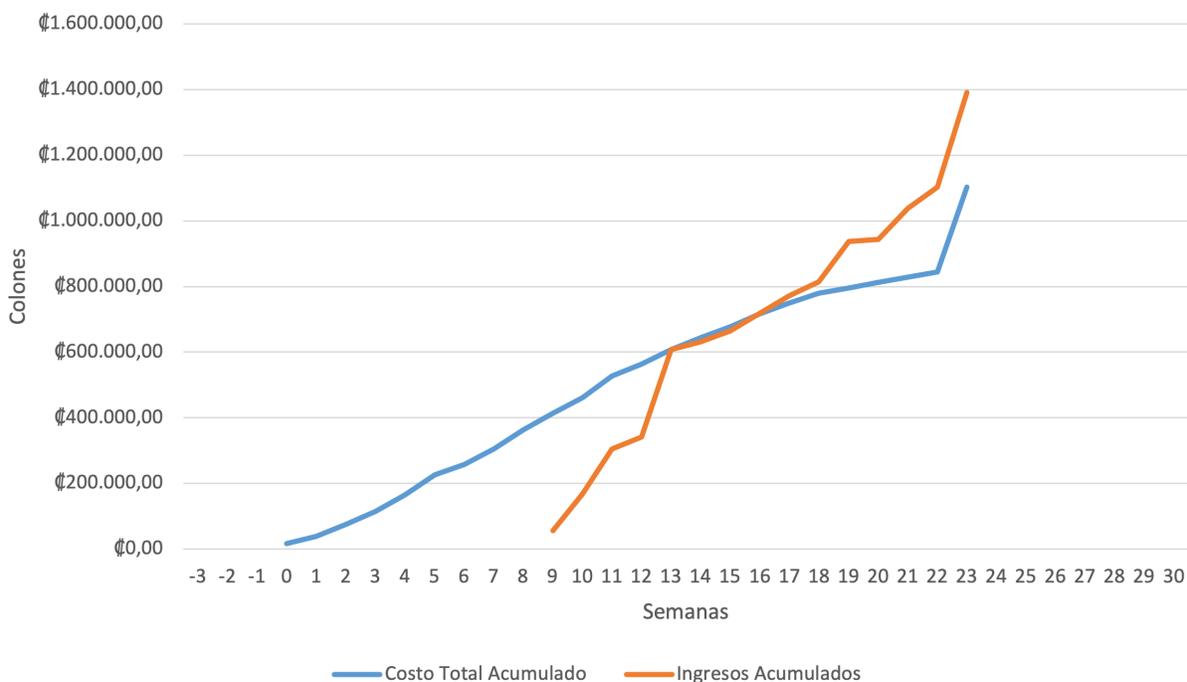


Figura 2. Punto de equilibrio Invernadero San Francisco de Peñas Blancas.

En la figura 2 se puede analizar que la empresa obtiene su punto de equilibrio entre la semana 13 y la semana 18, esto se puede determinar porque esta empresa tiene un mayor costo de producción que la primera, después de esas cinco semanas que la empresa ya comienza a obtener utilidades. Es importante recalcar que en esta empresa a partir de la semana 22 los costos de producción comenzaron a ser crecientes, lo que obligo a la empresa a cortar la producción en la semana 23 (5 meses y medio).

Conclusiones

Los costos de producción en el invernadero de San Francisco de Peñas Blancas son muy altos imposibilitando tener un buen margen de rentabilidad bruta. Los costos superan el doble a los costos de producción del invernadero de Cinchona. A pesar de que los precios de San Francisco de Peñas Blancas son más altos que Cinchona no puede mejorar su rentabilidad porque sus costos son mucho más altos.

Los costos de producción en el invernadero de Cinchona son la mitad del invernadero de San Francisco, esto les permite tener una utilidad bruta nominal mayor pese a que tiene un menor nivel de ingresos. Los precios de venta de cinchona son mucho más bajos que el invernadero de San Francisco, (precio de mercado en promedio 214,29 y vendieron el precio promedio de 63 colones), por eso los ingresos de Cinchona son mucho menores que San Francisco.

En el invernadero de Cinchona se puede analizar que la empresa obtiene su punto de equilibrio en la semana 13, es ahí donde los ingresos son iguales a los costos de producción, como se pudo ver en el grafico la empresa siguió explotando el cultivo hasta la semana 30 (7 meses) ya después de la semana 30 los ingresos comenzaron a ser decrecientes, por eso se termina la producción de ese ciclo en ese periodo.

En el invernadero de San Francisco de Peñas Blancas se puede analizar que la empresa obtiene su punto de equilibrio entre la semana 13 y la semana 18, esto se puede determinar porque esta empresa tiene un mayor costo de producción que la primera, después de esas cinco semanas que la empresa ya comienza a obtener utilidades. Es importante recalcar que en esta empresa a partir de la semana 22 los costos de producción comenzaron a ser crecientes, lo que obligo a la empresa a cortar la producción en la semana 23 (5 meses y medio).

Recomendaciones

Se recomienda al invernadero de Cinchona, buscar nuevos clientes o renegociar los precios con los actuales clientes, ya que el precio está más bajo que el mercado. También se recomienda seguir teniendo los ciclos de 7 meses para tener una mayor producción.

Se recomiendo al invernadero de San Francisco de Peñas Blancas bajar los costos de producción, buscar nuevos proveedores, ver la manera de buscar otros tipos de insumos que mejoren los precios sin bajar la calidad. Al bajar los costos de producción les permitirá aumentar el ciclo de producción de 5 meses y medio a 7 meses como en Cinchona para tener una mayor producción y por ende una mayor cantidad de ingresos.

Referencias

- [1] Rojas Méndez, José Javier y Paniagua Madrigal, Fernan (2015). Comportamiento agronómico de *Capsicum annum* L., *Lycopersicon esculentum* M. y *Cucumis melo* L. Bajo cultivo Protegido Hidropónico utilizando la solución universal de Steiner (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperada de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6413>
- [2] Urizar Ramon, Nataneal (2011). Producción de tomate bajo condiciones de invernadero en la comunidad de Chitapol, Uspantan, Quiché (Tesis de diplomado). Universidad San Carlos de Guatemala. Recuperada de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03_3787.pdf
- [3] Lamas Nolasco, M. A. (2010). *Oportunidad de negocio en Agricultura Protegida*. Mexico: Dirección General Adjunta de Inteligencia Sectorial.
- [4] Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2007). *Agrocadena Regional Cultivo Chile Dulce*. San Jose: Programa Agrícola Conservacionista Unidad de Gestión INTA.
- [5] Alas Martínez, Mauricio (2003). Estructura de costos, para la producción de hortalizas en invernaderos de la Cuenca del Río Reventazón, Turrialba, Costa Rica (Tesis de Maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- [6] Escobar, H. (2003). *Análisis de costos para hortalizas ecológicas*. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- [7] Moreno Reséndiz, A., Aguilar Duron, J., & Luévano Gonzales, A. (2011). Características de la Agricultura Protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 763-774.
- [8] Salazar Moreno, R., Rojano Aguilar, A., Figureroa Hernandez, E., & Francisco, P. S. (2017). Rentabilidad en la producción de hortalizas en ambientes controlados. *Universidad Autónoma de Chapingo*, 1-11.
- [9] Martínez Mora, Esteban (2003). Estudio de costos de producción para el cultivo de chile dulce (*Capsicum Annum*) bajo invernadero en la localidad de Pejibaye (Tesis de Bachillerato). Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperada de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/198/mora_martinez_esteban.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] Gitman Lawrence (2007). *Administración Financiera*. Pearson Education. Mexico.
- [11] Horngren, Charles.T; Datar, Srikant,M; Foster, George. *Contabilidad de costos*. Pearson. México.

Zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para suelos de Costa Rica

Geotechnical zoning using descriptive statistical parameters for Costa Rica's soils

Rafael Baltodano-Goulding¹

Fecha de recepción: 3 de marzo, 2023
Fecha de aprobación: 23 de junio, 2023

Baltodano-Goulding, R. Zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para suelos de costa rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 1. Enero-Marzo, 2024. Pág. 172-201.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i1.6675>

¹ LabUnsat, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rafael.baltodanogoulding@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-9607-2196>

Palabras clave

Datos estadísticos; método geoespacial; método geoestadístico; tipos de suelo; zonificación geotécnica.

Resumen

Con el objetivo de proveer información adicional para la realización de análisis y diseños geotécnico mediante un enfoque probabilístico cuando no se cuenta con una cantidad de datos que permita un procesamiento estadístico de los parámetros requeridos del suelo, se elaboró una zonificación geotécnica mediante estadísticos descriptivos para los suelos encontrados en Costa Rica, tomando en consideración el mapa geotécnico y las condiciones climáticas de Costa Rica. Para el ámbito geotécnico, se consideraron los mapas de zonificación geotécnica establecidos en el Código de Cimentaciones, mientras que en el meteorológico se tomaron en cuenta el Atlas Climatológico del Instituto Meteorológico Nacional. Como parte de los resultados se obtuvieron los valores promedio y la desviación estándar de diferentes tipos de suelos presentes en la zonificación efectuada en el país. La información geotécnica de los diferentes materiales se obtuvo de campañas geológicas y estudios geotécnicos privados. Estos datos son importantes porque al considerarlos, se logra disminuir la incertidumbre asociada a las características del suelo.

Keywords

Geospatial method; geostatistical method; geotechnical zoning; statistical data; types of soils.

Abstract

A geotechnical zoning was created using descriptive statistics for the soils found in Costa Rica, taking into consideration the geotechnical map and the climatic conditions of Costa Rica. This information can be used to provide additional information when geotechnical analyses and designs are to be performed through a probabilistic approach and an appropriate quantity of data is lacking to adequately allow for the statistical processing of soil parameters. Consideration of the Geotechnical Zoning included in the Costa Rica Foundation Code was taken. Additionally, Climatological Atlas of the National Meteorological Institute was also considered. As part of the results attained, the average values and the standard deviation of different types of soils were obtained. The geotechnical information on the different materials was obtained from geological surveys and private geotechnical studies. This data is important because when considering them, it is possible to reduce the uncertainty associated with the characteristics of the soil.

Introducción

La incertidumbre en los diseños ingenieriles debido a las propiedades geotécnicas está asociada al hecho que el suelo es un material cuyas características están sujetas a su origen de formación y a las condiciones climáticas espaciales y temporales [1]. La estimación adecuada de las propiedades geotécnicas del suelo ya que son los parámetros iniciales requeridos en cualquier análisis o diseño en un proyecto ingenieril [2][3]. La situación ideal para obtener estos datos es poder realizar una cantidad estadísticamente significativa de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio para efectuar un análisis probabilístico de los resultados que permita cuantificar adecuadamente la incertidumbre asociada a los materiales presentes en el proyecto. Sin embargo, en algunos proyectos, como por ejemplo viviendas, no se cuenta con el presupuesto para poder realizar una investigación geotécnica que permita la

identificación completa y precisa de las condiciones de heterogeneidad del sitio, por lo que la representatividad de los muestreos realizados no siempre alcanza los niveles de confianza deseables [2][4].

Es común que en proyectos no sea posible realizar un estudio geotécnico detallado del terreno por aspectos económicos y plazos para ejecutar la obra. Por esta razón, al no contar con suficiente información para cuantificar adecuadamente la incertidumbre asociada a los parámetros necesarios para el análisis y diseño geotécnico en ocasiones es necesario recurrir a altos valores de factores de seguridad para poder garantizar niveles de riesgo y de desempeño aceptables. El factor de seguridad ha sido una base para el diseño determinístico de las estructuras. No obstante, haber obtenido un factor de seguridad mayor a 1, considerando los valores de las propiedades geotécnicas utilizados en el diseño, no garantiza que la estructura será estable por la variabilidad de las características del suelo, ya que mediante esta metodología no es posible conocer la confiabilidad del modelo utilizado [1][2].

Para poder realizar análisis y diseños probabilísticos se debe contar con una gran cantidad de datos que permita determinar los valores promedios y su correspondiente medida de dispersión, sin embargo, cuando no se cuenta con esta información se pueden obtener coeficientes de variación indicados en la literatura, que luego se pueden utilizar para realizar una simulación o aplicar algún otro método probabilístico. A pesar de que se cuenta con información de este tipo, por ejemplo, brindada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América[3], es posible establecer una base de datos estadísticos del suelo con información de Costa Rica, de esta forma en caso de contar con la posibilidad de obtener estadísticos generados del proyecto, se pueden suponer valores de los parámetros geotécnicos a partir de la información analizada con datos recopilados de otro proyectos realizado en la misma zona.

Como resultado de la investigación realizada se presentan los valores de promedio y desviación estándar de diferentes parámetros geotécnicos para los suelos hallados en Costa Rica. Para algunas provincias se tienen estos datos estadísticos para la cohesión no drenada, peso unitario total y grado saturación del suelo, mientras que otras cuentan con información adicional para el ángulo de fricción efectivo. Esta situación indica que hay suficiente información para realizar un análisis estadístico tanto para un diseño geotécnico a corto plazo (condición no drenada) como para largo plazo (condición drenada) para algunas regiones nacionales.

Metodología

Para poder obtener los datos de promedio y desviación estándar de diferentes propiedades geotécnicas de los suelos encontrados en Costa Rica, se llegaron a aplicar dos métodos. Uno de ellos consiste en un análisis geoespacial, donde se ubican las muestras de suelo recolectadas con sus coordenadas para poder agrupar sus resultados de los ensayos de laboratorio y, de esta forma, generar una clasificación de los datos por zonas en el territorio nacional. El otro método aplica un análisis geoestadístico, que en él se aplica un modelo geoespacial, pero también se predice la distribución de los resultados del ensayo de laboratorio en las zonas contempladas en el país [4][5][6][7]. Esta base de datos estadísticos se realizó en tres agrupaciones por provincias:

1. San José y Cartago con el método geoespacial [8];
2. Guanacaste, Puntarenas y Limón con el método geoestadístico [9];
3. Heredia y Alajuela con el método geoespacial [10].

En términos generales, las tres agrupaciones siguieron la misma metodología que consta de tres pasos: recolección; georreferenciación; y agrupación de los datos. No obstante, para cada grupo de provincias se realizaron diferentes procedimientos para realizar estos tres pasos. Los análisis hechos para estos grupos de provincias fueron realizados como parte del proyecto de investigación 321-B2-274 Diseño probabilístico de estructuras geotécnicas cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación de los suelos en Costa Rica, el cual tiene aportes de cuatro diferentes proyectos de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para obtener la base de datos estadísticos de suelo de cada una de estas agrupaciones realizadas.

Resultados

San José y Cartago

El procedimiento seguido y los resultados obtenidos sobre la base de datos estadísticos para las provincias de San José y Cartago estuvo a cargo de Valverde [8]. Primero, se realizó la recolección de datos provenientes de distintas fuentes, como las campañas geológicas hechas por la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y estudios geotécnicos efectuados por dos empresas geotécnicas privadas. Sin embargo, los datos utilizados fueron los de los estudios geotécnicos hechos por las empresas privadas porque no se tenía una cantidad considerable de muestras para análisis estadístico con las campañas geológicas. Por esta razón, los valores de las campañas geológicas sirvieron como parámetro de comparación con los valores calculados en los estudios geotécnicos. Con respecto a los estudios geotécnicos considerados en la base de datos, se tomaron en cuenta aquellos que tuviesen información de los límites de consistencia del suelo, números de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT) y contenido de humedad del suelo. Finalizado el proceso de selección de datos, la base para estas zonas cuenta 702 muestras de suelo.

Adicionalmente, se utilizaron aquellos estudios geotécnicos con resultados experimentales del peso unitario total (233 datos) para determinar la exactitud de la correlación utilizada en aquellas muestras de suelo que no contaban con este parámetro. Para calcular el peso unitario total (γ_T) del suelo, se usó la siguiente ecuación:

$$\gamma_T = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + e_c} \quad (1)$$

Donde G_s es la gravedad específica, γ_w el peso unitario del agua, w el contenido de humedad gravimétrico del suelo y e_c la relación de vacíos del material. Al contar en todos los casos con estos valores, fue necesario realizar una estimación utilizando la ecuación 2 y 3:

$$e_c = \frac{C_c}{0,317} + 0,22 \quad (2)$$

$$C_c = 0,0068(w_n + 2,8) \quad (3)$$

Donde C_c es el índice de compresión del suelo y w_n el contenido de humedad gravimétrica natural de la muestra. Con respecto a la gravedad específica del suelo, se usó un valor recomendado en el trabajo de Laporte & Saenz [11], el cual es de 2,69, independientemente de la clasificación de los materiales analizados.

Para obtener el valor de la cohesión no drenada, se utilizó la siguiente ecuación 4, la cual es de uso frecuente en el país [12]:

$$C = \frac{N_{SPT}}{2} \quad (4)$$

Donde C es la cohesión en ton/m² y N_{SPT} es el número de golpes de mazo en 30 cm de recorrido. Esta correlación puede llegar a dar valores muy altos de cohesión, por lo que no se tomó en cuenta para resultados de N_{SPT} mayores a 50 golpes a la hora del cálculo del promedio final. Asimismo, no se utilizaron metodologías de corrección de los valores de N_{SPT} ya que no es común su uso a nivel privado, además de que son dependientes del equipo utilizado.

Por último, el valor de saturación (% S) se obtuvo con la ecuación 5:

$$\%S = \frac{G_s w}{e_c} \quad (5)$$

Esta ecuación llega a dar un valor aproximado del valor real porque hay ocasiones en las que hay valores mayores al 100%, situación que es físicamente imposible porque no se puede tener un volumen de agua superior al volumen de vacíos, partiendo del supuesto de volumen constante, por lo que se supone que el peso volumétrico no cambia al variar el contenido de humedad. Luego, se georreferenciaron las perforaciones que se consideraron en la muestra para la base de datos. Para poder realizar este paso, algunas perforaciones contaban con las coordenadas exactas, mientras que la mayoría tenía el número de plano catastro, por lo que se usaron las coordenadas aproximadas de cada propiedad. Para aquellas perforaciones donde no se tenía ninguna de esta información, se utilizó la dirección de cada uno de los proyectos, y se aproximó su posición en el mapa para obtener las coordenadas. Después, las muestras de suelo fueron clasificadas por tipo de material, según la clasificación establecida por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), utilizando los resultados de los límites de consistencia del suelo. Con toda esta información, se logró introducir en un mapa del área de interés la ubicación de las muestras de suelo consideradas, considerando la clasificación geotécnica.

Para poder clasificar los datos utilizados por zona, se usó la zonificación geotécnica que se presenta en el Código de Cimentaciones de Costa Rica [13] (2002) realizada por Bogantes [14][15]. Entonces, se colocaron las coordenadas de las muestras de suelo en el mapa de zonificación geotécnica para poder separar las muestras en cada zona y, de esta manera, generar promedios y desviaciones estándar para cada parámetro geotécnico considerado, por tipo de suelo según SUCS. Algunas de las zonas establecidas en el mapa se fusionaron por la similitud en los materiales que describen.

Guanacaste, Puntarenas y Limón

Esta parte de la base de datos se trabajada por Bravo [9]. La metodología seguida para obtener los parámetros estadísticos de las propiedades geotécnicas de los suelos encontrados en las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón se inició con la recolección de los datos. En este caso, se utilizó información obtenida de proyectos de graduación, campañas geológicas de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y estudios geotécnicos facilitados por instituciones y empresas públicas y privadas. Se llegó a revisar, en total, 508 muestreos de ensayos de penetración estándar (222 de Guanacaste, 193 de Puntarenas y 93 de Limón). De estudios geotécnicos efectuados por la empresa privada entre el 2003 y el 2005, se obtuvo 4559 datos del número de golpes del ensayo penetración estándar (N_{SPT}), 2346 del

contenido de humedad natural, 598 del peso específico total y 559 de cohesión inconfiada. Para este caso, sí se aplicó la ecuación de corrección de los golpes del ensayo de SPT para contrarrestar posibles alteraciones en estos resultados en vista de que todos los datos provienen de la misma fuente. Se utilizó la ecuación propuesta por Castillo [12], la cual es:

$$N_{SPT, \text{ normalizado}} = \frac{40N_{SPT}}{60} \quad (6)$$

Para obtener el grado de saturación del suelo, se utilizó la ecuación (5), y se utilizó datos del trabajo de Laporte y Sáenz [11] para tener un valor de gravedad específica de 2,69 y para establecer la siguiente ecuación para la relación de vacíos:

$$e_c = 0,0214w + 0,3517 \quad (7)$$

Como no se tenía una cantidad de datos suficientes de cohesión no drenada para suelos de grano fino, se obtuvo una correlación con los golpes de SPT, dando con la siguiente ecuación:

$$C_u = 3,206 \ln N_{SPT} \quad (8)$$

De igual manera, se buscó otra correlación para obtener el ángulo de fricción efectivo de los suelos de grano fino basada en los golpes de SPT, por lo que se utilizó de Bowles [16]:

$$\varphi' = 0,3N_{SPT} + 20 \quad (9)$$

Utilizando esta información se realizó una modelización geoestadística de los parámetros geotécnicos, confeccionada específicamente para cada tipo de suelo por provincia y subdividido para facilitar la investigación. Estas subdivisiones se definieron en función de la densidad de los datos, geología, hidrología y meteorología para que el análisis presentara uniformidad y, además, para obtener datos estadísticos homogéneos. En el aspecto geológico, se utilizó la zonificación geotécnica general establecida en el Código de Cimentaciones de Costa Rica [13], mientras que para el aspecto hidrológico y meteorológico, se emplearon las regiones climáticas definidas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [17] y la subzona es definida basándose en los meses de la época seca y lluviosa, precipitación anual y evapotranspiración anual de estas tres provincias.

Al definir las zonas de estudio, se describió estadísticamente los parámetros geotécnicos de cohesión no drenada, ángulo de fricción efectivo, contenido de humedad gravimétrico, peso unitario total y grado de saturación. Para poder definir el modelo estadístico de análisis fue utilizada la campana de Gauss para observar el comportamiento de los datos.

Heredia y Alajuela

Esta sección de la base de datos estuvo a cargo de Acuña [10]. En términos generales, se siguió mismo procedimiento realizado para las provincias de San José y Cartago. Los valores de las distintas propiedades del suelo fueron obtenidos de varios ensayos de penetración estándar SPT realizados en estas dos provincias, donde se obtiene información de N_{SPT} y contenido de humedad gravimétrico del suelo. Para los otros parámetros se utilizaron las ecuaciones (1) a la (5).

De igual manera, se utilizaron las coordenadas de las perforaciones para la ubicación de los puntos por medio de un programa de sistemas de información geográfica (SIG), considerando la zonificación geotécnica general y de la GAM hechas por Bogantes [14] [15]. Cuando no se

contaba con las coordenadas, pero sí con el número del plano catastrado, se estimaron las coordenadas aproximadas del lote donde se realizaron las perforaciones. Si no se tenía ninguna de esta información, se utilizó la herramienta de Google Earth® para ubicar la localización del terreno.

Adicional a la utilización de los mapas de zonificación geotécnica, se clasificaron los materiales encontrados según SUCS para tener una descripción más detallada. En caso de tener zonas con características similares se consideraron como un grupo.

Parámetros estadísticos del suelo en Costa Rica

Para la realización de la base de datos estadísticos del suelo en Costa Rica, se utilizaron tres agrupaciones, por lo que los resultados se presentarán de esa manera. Brizuela [18] estuvo a cargo de la recopilación de la base de datos estadísticos de todas las provincias de Costa Rica mediante el programa de sistema de información geográfica ArcGIS®, donde se generaron mapas con información de las diferentes propiedades geotécnicas requeridas para el diseño geotécnico de una estructura, como la cohesión no drenada, ángulo de fricción efectivo, peso específico total y grado de saturación.

En la figura 1 se puede visualizar el mapa con las zonas con las que se cuentan con datos estadísticos de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación en la Gran Área Metropolitana. Se aprecia que la gran mayoría de esta zona se cuenta con esta información, por lo que es posible utilizar esta información para realizar diseños y análisis geotécnicos mediante una metodología probabilística. Es importante mencionar que este mapa contempla la zonificación geotécnica de la GAM establecida por Bogantes [14] [15].

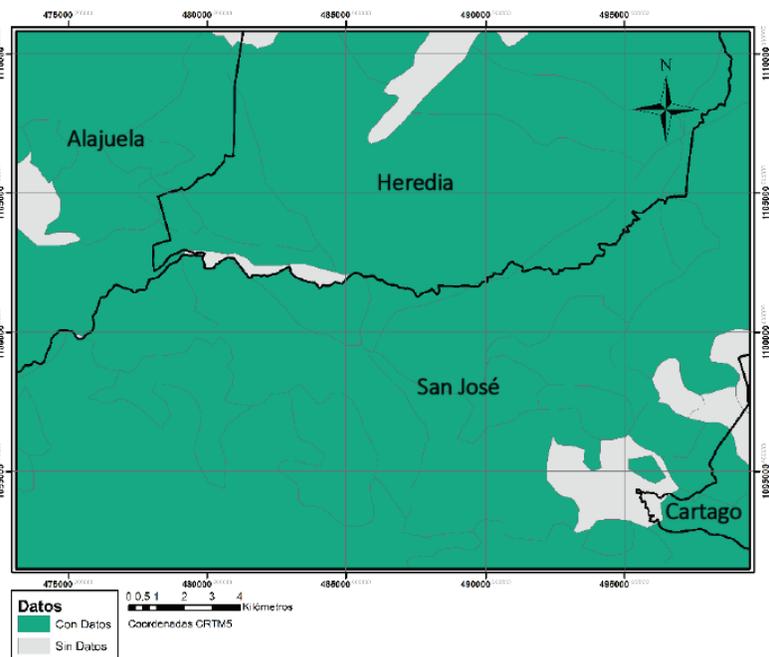


Figura 1. Zonas con datos de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación en la GAM. Fuente: [15]

La figura 2 muestra el mapa que incluye las áreas de Alajuela, Heredia, Cartago y San José que presenta información estadística de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación del suelo.

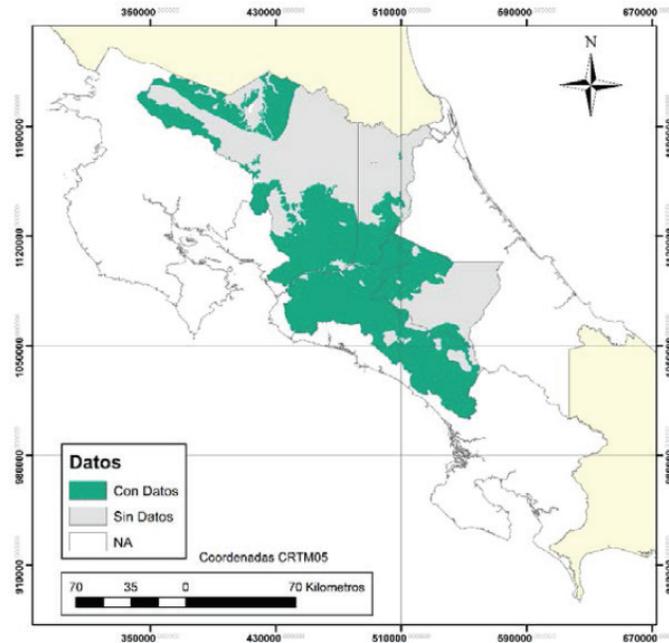


Figura 2. Zonas con datos de cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación para las provincias de Alajuela, Cartago, Heredia y San José. Fuente: [18]

Para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón, se presentan diferentes mapas para las propiedades geotécnicas porque no en todos los sitios se tiene toda la información requerida para un análisis estadístico. En la figura 3 se observan las zonas donde se encuentran datos de cohesión no drenada y peso unitario total, para todas las provincias. Debido a los tipos de suelos presentes en otras zonas el país hasta profundidades de 3 metros, se presentan los datos de ángulo de fricción efectivo en la provincia de Limón (figura 4) y grado de saturación del suelo en Guanacaste (figura 5).

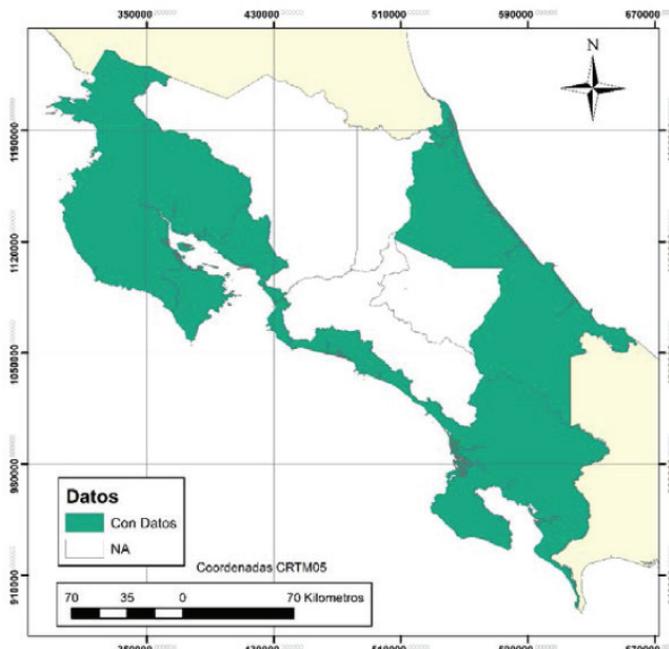


Figura 3. Zonas con datos de cohesión no drenada y peso unitario total para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. Fuente: [18]

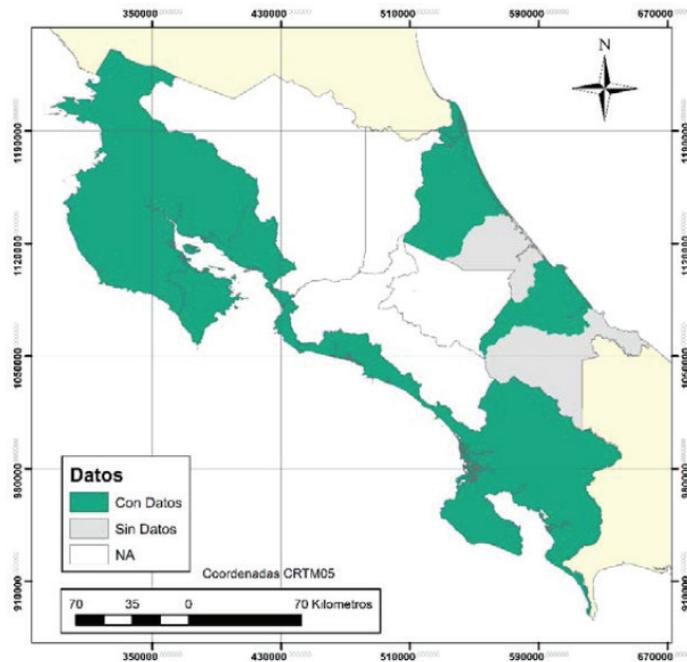


Figura 4. Zonas con datos de ángulo de fricción efectivo para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. Fuente: [18]

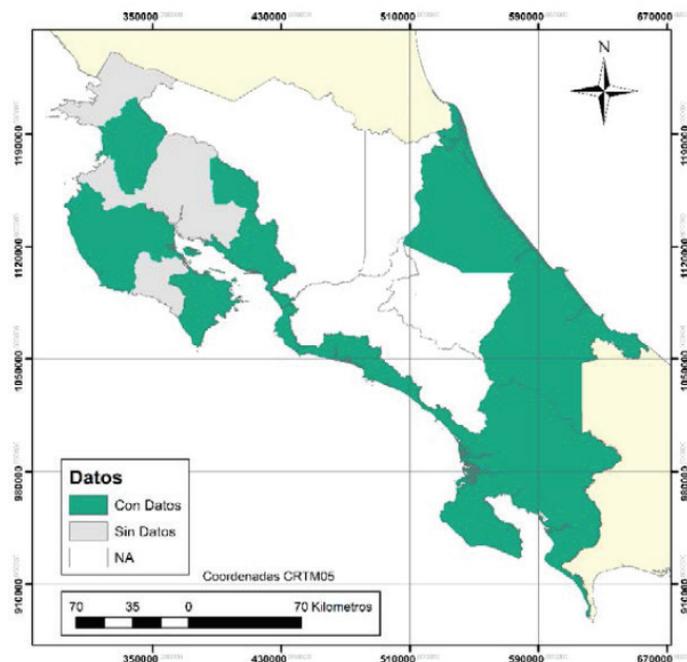


Figura 5. Zonas con datos de grado de saturación del suelo para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón. Fuente: [18]

Con esta información es posible crear la base de datos del país para determinar las zonas con las que se cuenta con información de cohesión no drenada y peso unitario total (figura 6), ángulo de fricción efectivo (figura 7) y grado de saturación del suelo (figura 8).

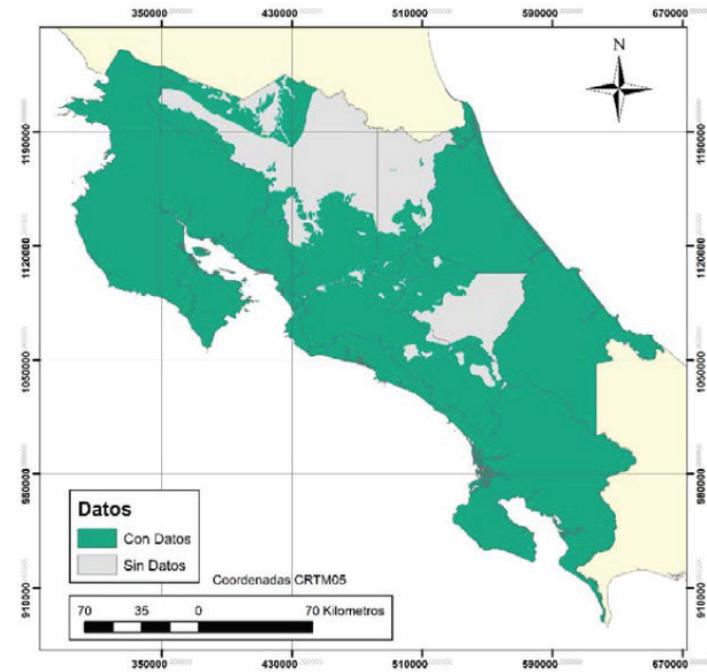


Figura 6. Zonas con datos de cohesión no drenada y peso unitario total para Costa Rica. Fuente: [18]

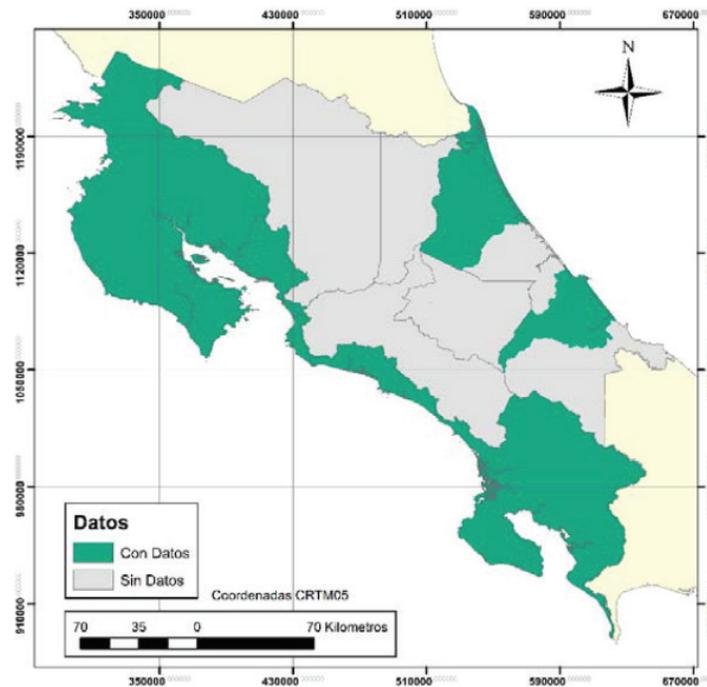


Figura 7. Zonas con datos de ángulo de fricción efectivo para Costa Rica. Fuente: [18]

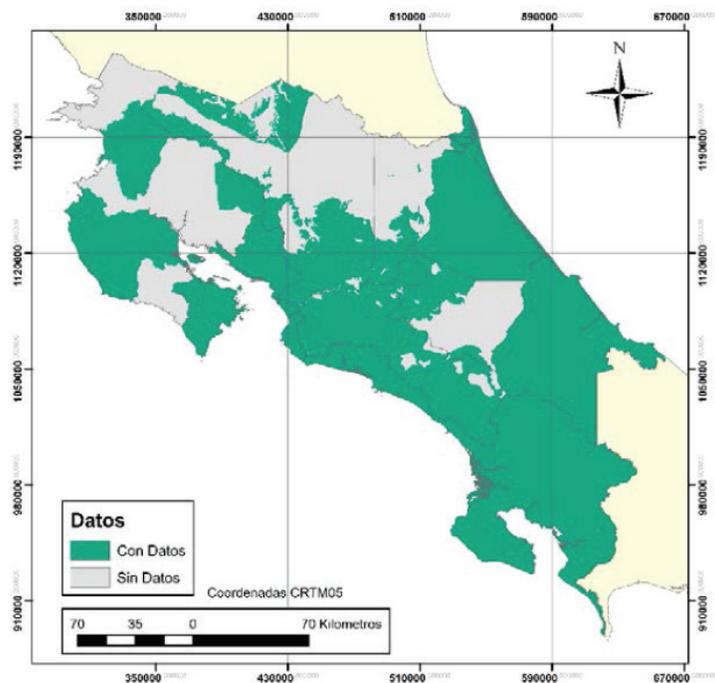


Figura 8. Zonas con datos de grado de saturación del suelo para Costa Rica. Fuente: [18]

La figura 9 establece las zonas en las que se pueden utilizar los estadísticos presentados en esta investigación para realizar un análisis o diseño probabilístico de una estructura geotécnica.

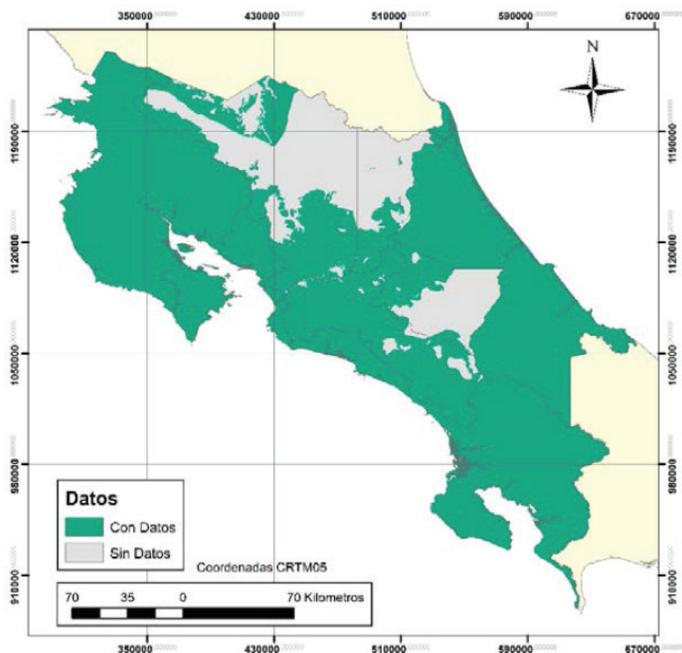


Figura 9. Zonas con datos estadísticos en Costa Rica [18]

A continuación, se presenta de manera más específica los resultados estadísticos obtenidos para cada una de las agrupaciones de las provincias.

San José y Cartago

En la figura 10 se presentan los puntos georreferenciados en las provincias de San José y Cartago, donde se aprecia que la gran mayoría de las perforaciones se encuentran en la Gran Área Metropolitana (GAM), mientras que hay algunos puntos en los cantones más lejanos. Los puntos corresponden a centros de población que es donde se realizan una mayor cantidad de estudios geotécnicos. Por consiguiente, existen grandes áreas boscosas y montañosas sin datos sobre sus propiedades geotécnicas.

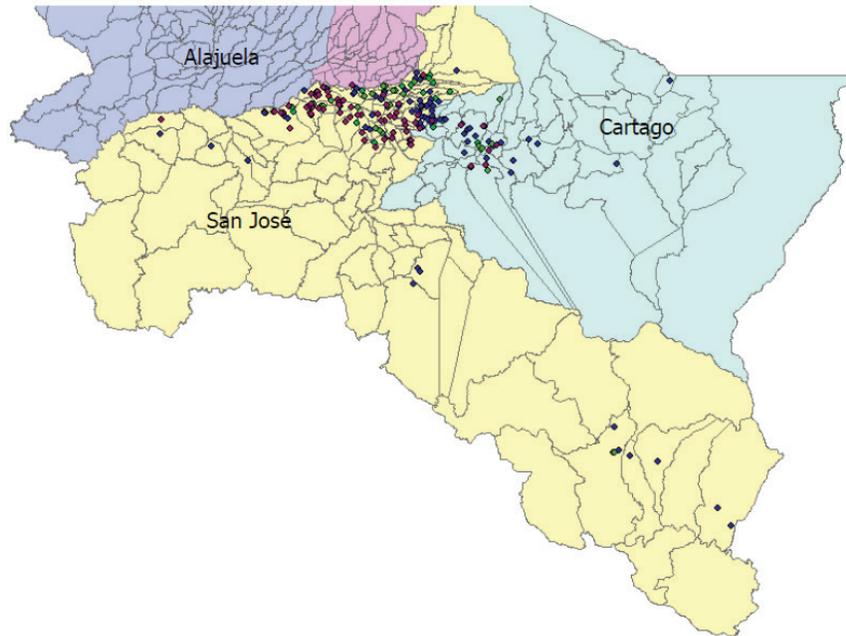


Figura 10. Ubicación de las muestras de suelo en las provincias de San José y Cartago. Fuente: [8]

En la Figura 11 se muestra un acercamiento de los puntos georreferenciados en la GAM para estas dos provincias, donde se puede observar que no hay una tendencia de ubicación según el tipo de suelos por medio de la clasificación por SUCS. Debido a la gran cantidad de puntos en este sector y para poder disminuir la incertidumbre en los datos, se realizó un análisis solo con los suelos dentro de los límites de la GAM.

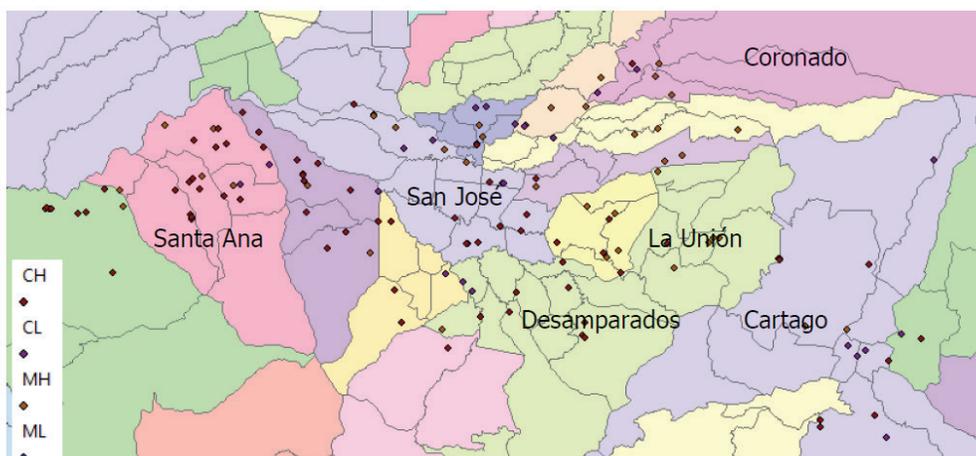


Figura 11. Puntos georreferenciados en la Gran Área Metropolitana para las provincias de San José y Cartago. Fuente: [8]

Al unir esta información con los puntos georreferenciados utilizados para las provincias de Heredia y Alajuela. Como la GAM, según la zonificación geotécnica del Código de Cimentaciones de Costa Rica [13], se alcanzó una mejor aproximación de valores estadísticos. La ubicación de los puntos georreferenciados se presenta en la figura 12. Se puede observar que el suelo tipo CH (arcilla de alta plasticidad) se llega a ubicar en el sector sur de la GAM, mientras que los suelos ML y MH (limo de baja y alta plasticidad, respectivamente) se presentan esparcidos en toda esta área. Algunas de las descripciones de las zonas geotécnicas determinadas en el mapa de la GAM presentan características similares, por lo que se llegaron a unir para un análisis más completo por ser materiales muy similares. Esto no llegó a realizarse para las zonas establecidas en el mapa general. La descripción de los diferentes materiales encontrados en este sector del país se encuentra en el cuadro 1. Se observa que, en términos generales, la gran mayoría consiste de suelo de grano fino, residuales y con potencial de expansión.

Teniendo esta zonificación en cuenta se prosiguió a obtener la densidad de los datos por área de la zona contemplada (cuadro 2). Algunos de los tipos de suelo según SUCS se unieron para tener una mayor densidad de datos en una zona de gran área y lograr de esta manera una cantidad significativa de datos. Se debe tomar en cuenta que no se combinaron arcillas y limos, y se evitó unir las arcillas de alta plasticidad y de baja plasticidad debido a que presentan grandes diferencias en su comportamiento.

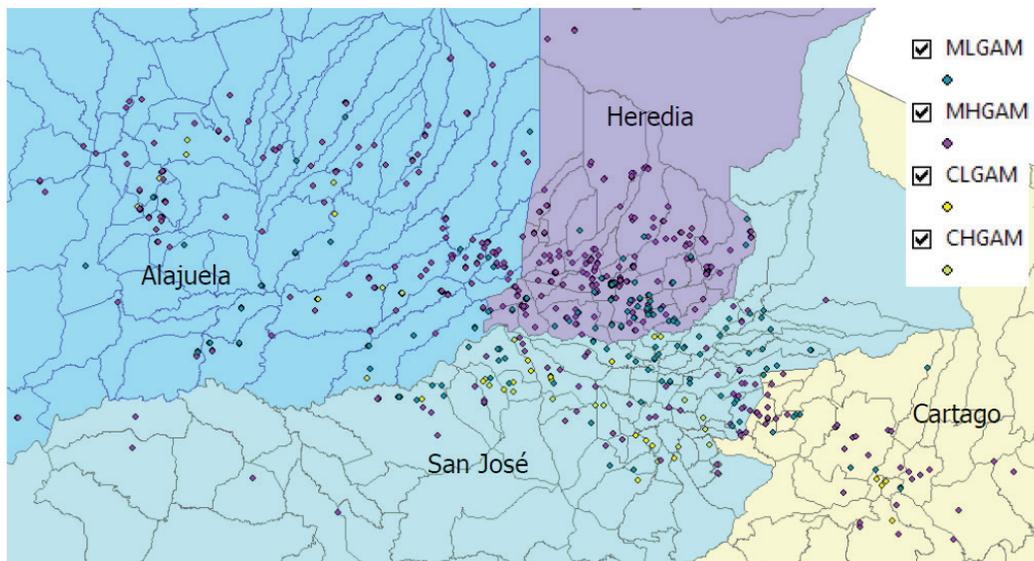


Figura 12. Puntos georreferenciados en la Gran Área Metropolitana. Fuente: [8].

Cuadro 1. Descripciones del suelo o en la zonificación de la GAM y del mapa San José del CCCR.

Tipo de mapa	Zonas	Descripción
Zonificación geotécnica de la GAM	2, 8, 20	Suelos blandos, geología de piroclastos
	3, 11, 22, 23	Suelos blandos
	4, 28, 29, 31	Arcilla gris y café, CH, alto potencial de expansión
	5	Arcilla gris, CH, alto potencial de expansión
	6, 30, 32, 33	Arcilla gris, CH alto potencial de expansión
	9, 21, 26	Condiciones favorables de cimentación
	12, 19	Limos colapsables y arcilla gris subsuperficial, alto potencial de expansión
	14, 15, 16	Suelos blandos y arcilla gris, MH y CH, alto potencial de expansión
	18	Arcilla gris, CH
	25	Colada de lava Los Ángeles
	27	Arcilla negra subsuperficial, subyacida por arcilla gris, muy alto potencial de expansión
Zonificación geotécnica general de Costa Rica	Am	Suelos residuales de color amarillento
	Lat	Suelos residuales rojizos
	V2	Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amórficos
	V2w	Suelo volcánicos con gran contenido de minerales amórficos en zonas húmedas
	V3	Suelos residuales de origen volcánico
	V3w	Suelos residuales de origen volcánico en zonas húmedas

Fuente: [8].

Mediante el uso del programa de sistemas de información geográfica ArcGIS® para poder zonificar las variables calculadas y apreciar la ubicación de los puntos de perforación con las zonas geotécnicas establecidas en el Código de Cimentaciones de Costa Rica. La información de la densidad de datos para estas zonas geotécnicas se presenta en las Figura 13 y Figura 14. La primera, que representa el área de la zona V3 en la GAM, presenta una alta densidad, mientras que la otra (área de la zona 14, 15, 16) muestra una baja densidad de datos. Las zonas con bajas densidades de datos representan un análisis menos significativo por la baja cantidad de datos para obtener los parámetros geotécnicos.

Cuadro 2. Densidad de puntos por zona geotécnica.

Zonas	Tipo de suelo	Cantidad de datos	Área (km ²)	Densidad (datos/m ²)
2, 8, 20	CL+CH	23	45	0,516
	ML	42		0,942
	MH	31		0,695
3, 11, 22, 23	ML	23	38	0,605
	MH	75		1,974
4, 28, 29, 31	CH	27	35	0,771
	ML+MH	22		0,629
5	ML+MH	28	6	4,667
6, 30, 32, 33	CL	19	62	0,306
	CH	45		0,726
	ML+MH	37		0,597
9, 21, 26	CL	18	120	0,150
	CH	24		0,200
	ML	53		0,442
	MH	328		2,733
12, 19	ML+MH	42	10	4,386
14, 15, 16	ML+MH	126	46	2,724
25	MH	43	6	7,167
27	CL+CH	25	33	0,758
	ML+MH	40		1,212
Am	CL	21	3379	0,006
	CH	76		0,022
	ML+MH	108		0,032
Lat	CL+CH	61	12851	0,005
	ML	24		0,002
	MH	85		0,007
V2	ML+MH	63	162	0,389
V2w	ML+MH	77	1488	0,052
V3	CL	65	2166	0,030
	CH	83		0,038
	ML	127		0,059
	MH	733		0,338
V3w	ML+MH	34	3186	0,011

Fuente: [8].

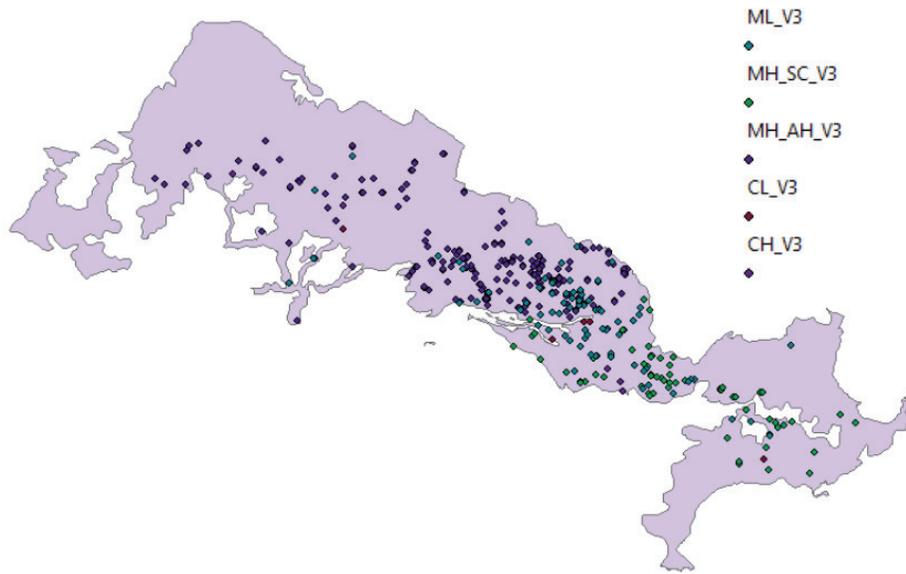


Figura 13. Puntos georreferenciados en la zona V3 en la GAM. Fuente: [8]

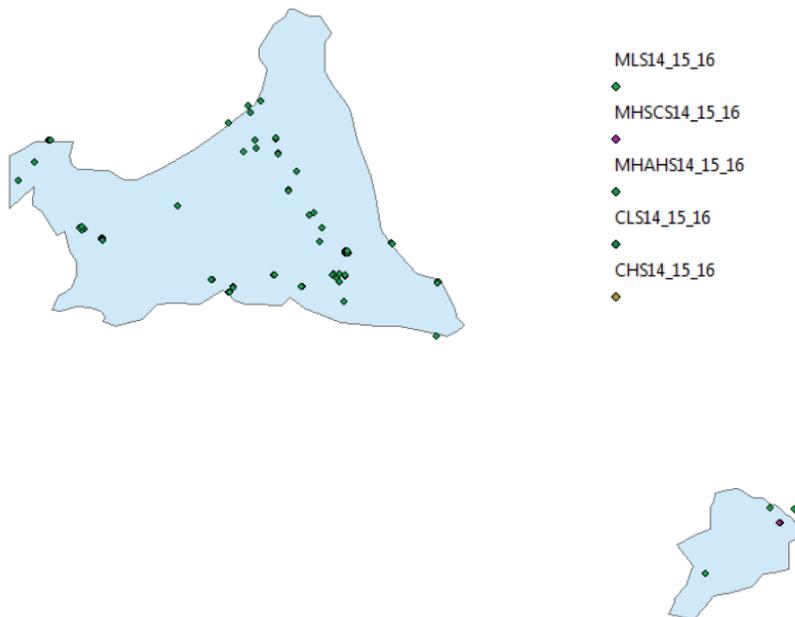


Figura 14. Puntos georreferenciados en la zona 14, 15, 16 en la GAM. Fuente: [8]

Una vez procesada la información se obtuvieron los valores promedio y la desviación estándar para las siguientes propiedades geotécnicas: contenido de humedad gravimétrico, límite líquido, índice de plasticidad, razón de vacíos, porosidad, saturación, peso unitario total, y cohesión no drenada del suelo. Los resultados de estos valores se presentan en la Tabla para la cohesión no drenada, el peso unitario total y el grado de saturación, y en la Tabla se muestran los valores para el contenido de humedad gravimétrico, límite líquido, índice de plasticidad, razón de vacíos y porosidad.

Cuadro 3. Valores de promedio y desviación estándar de la cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación para las provincias de San José y Cartago.

Zona	Tipo de suelo	Cohesión (ton/m ²)		Peso unitario total (ton/m ³)		Saturación (%)	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
2, 8, 20	CL+CH	8,87	6,92	1,79	0,04	90,89	4,82
	ML	10,32	6,71	1,78	0,04	91,95	4,49
	MH	8,73	5,95	1,70	0,13	96,61	3,59
3, 11, 22, 23	ML	6,45	5,31	1,75	0,05	94,91	6,31
	MH	7,47	5,24	1,72	0,06	97,39	3,50
4, 28, 29, 31	CH	11,46	6,54	1,80	0,05	89,39	6,78
	ML+MH	11,34	6,50	1,78	0,06	90,99	6,74
5	ML+MH	9,50	6,10	1,79	0,07	90,46	7,22
6, 30, 32, 33	CL	10,82	7,26	1,85	0,06	82,26	8,82
	CH	8,49	6,55	1,78	0,06	92,11	8,36
	ML+MH	10,43	7,29	1,77	0,06	93,35	5,66
9, 21, 26	CL	11,4	7,41	1,83	0,04	88,23	6,47
	CH	10,60	7,03	1,77	0,05	95,51	4,37
	ML	8,25	4,62	1,77	0,04	93,36	4,18
	MH	9,22	5,96	1,73	0,07	96,87	3,91
12, 19	ML	5,96	6,05	1,75	0,05	95,68	5,08
	MH	8,84	6,70	1,75	0,05	95,17	4,86
14, 15, 16	ML+MH	7,73	5,87	1,73	0,07	96,29	4,62
25	MH	6,62	4,45	1,67	0,10	98,14	4,13
27	CL+CH	11,86	6,13	1,82	0,07	86,90	9,34
	ML+MH	8,47	5,27	1,77	0,06	92,50	6,40
Am	CL	7,89	4,88	1,79	0,08	89,92	10,48
	CH	10,14	6,46	1,78	0,07	91,17	7,60
	ML+MH	8,66	5,89	1,76	0,06	93,57	6,55
Lat	CL+CH	10,40	6,33	1,81	0,08	88,13	11,66
	ML	10,77	6,15	1,82	0,05	86,44	8,28
	MH	10,45	6,90	1,77	0,05	93,91	5,19
V2	ML+MH	4,80	3,58	1,65	0,11	98,83	3,45
V2w	MH	5,66	4,49	1,53	0,17	99,49	1,24
V3	CL	10,42	6,76	1,82	0,05	88,00	6,30
	CH	9,57	6,02	1,77	0,05	94,01	5,27
	ML	8,35	5,93	1,77	0,05	92,59	5,85
	MH	8,48	5,77	1,71	0,08	97,10	3,88
V3w	ML+MH	7,32	5,50	1,63	0,14	98,90	1,70

Fuente [8].

Cuadro 4. Valores de promedio y desviación estándar del contenido de humedad, límite líquido, índice de plasticidad, relación de vacíos y porosidad para las provincias de San José y Cartago.

Zona	Tipo de suelo	Contenido de humedad		Límite líquido		Índice de plasticidad		Razón de vacíos		Porosidad	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
2, 8, 20	CL	33,5	4,5	42,5	3,5	18,0	3,0	1,0	0,1	50,0	3,0
	CH	42,0	10,0	60,5	16,5	31,0	15,0	1,2	0,2	53,5	4,5
	ML	36,5	6,5	45,0	4,0	14,0	4,0	1,1	0,2	51,5	3,5
	MH	54,5	27,5	73,5	34,5	24,5	14,5	1,5	0,6	57,5	7,5
3, 11, 22, 23	CL	35,5	3,5	41,5	3,5	17,0	3,0	1,1	0,1	51,0	2,0
	CH	47,0	5,0	60,5	5,5	31,5	3,5	1,3	0,1	56,0	2,0
	ML	42,5	9,5	44,0	4,0	14,5	3,5	1,2	0,2	54,0	5,0
	MH	50,0	11,0	23,0	7,0	1,5	0,5	57,0	4,4	10,0	9,0
4, 28, 29, 31	CL	19,5	6,5	42,0	5,0	20,5	4,5	0,7	0,1	40,5	4,5
	CH	34,0	10,0	66,0	14,0	38,5	12,5	1,0	0,2	50,0	5,0
	ML	27,0	6,0	43,0	5,0	13,5	3,5	0,9	0,2	46,0	4,0
	MH	41,5	13,5	60,5	9,5	24,0	7,0	1,2	0,3	53,5	4,5
5	CH	34,5	12,5	67,5	13,5	38,5	11,5	1,0	0,3	49,5	6,5
	ML	34,0	12,0	42,0	6,0	11,5	3,5	1,1	0,3	49,5	5,5
	MH	40,0	16,0	60,5	9,5	25,0	6,0	1,2	0,4	52,5	5,5
6, 30, 32, 33	CL	26,5	8,5	41,5	5,5	18,5	4,5	0,9	0,2	45,5	5,5
	CH	39,0	11,0	72,0	17,0	44,0	15,0	1,2	0,3	52,0	6,0
	ML	35,0	16,0	43,0	5,0	16,0	4,0	1,1	0,4	49,5	6,5
	MH	41,5	10,5	64,5	12,5	28,0	10,0	1,2	0,2	53,5	4,5
9, 21, 26	CL	31,0	6,0	46,0	3,0	20,0	2,0	1,0	0,2	48,5	3,5
	CH	41,5	7,5	72,0	18,0	41,5	15,5	1,2	0,2	53,5	3,5
	ML	39,0	6,0	46,0	3,0	15,0	4,0	1,1	0,1	52,5	3,5
	MH	48,0	13,0	65,0	14,0	23,5	7,5	1,3	0,3	56,5	4,5
12, 19	CH	40,5	5,5	64,5	9,5	35,0	8,0	1,2	0,2	53,5	2,5
	ML	43,5	10,5	40,0	6,0	11,0	4,0	1,2	0,2	54,5	4,5
	MH	44,0	10,0	63,0	8,0	23,5	6,5	1,2	0,2	54,5	4,5
14, 15, 16	CH	38,5	9,5	64,0	7,0	35,0	6,0	1,1	0,2	52,0	5,0
	ML	37,0	9,0	44,0	5,0	15,0	4,0	1,1	0,2	51,0	5,0
	MH	48,5	11,5	66,0	10,0	25,5	7,5	1,4	0,3	56,5	4,5
18	CH	35,0	6,0	66,0	13,0	37,5	12,5	1,0	0,1	50,5	2,5
25	MH	59,5	18,5	77,0	17,0	20,5	8,5	1,6	0,4	60,0	6,0
27	CL	26,0	6,0	42,5	4,5	19,5	3,5	0,9	0,2	45,0	4,0
	CH	36,0	12,0	68,0	18,0	39,0	15,0	1,1	0,3	50,5	6,5
	ML	34,0	12,0	46,0	5,0	14,5	4,5	1,0	0,3	49,5	5,5
	MH	44,0	11,0	65,0	10,0	25,0	6,0	1,3	0,3	54,5	4,5
Am	CL	25,5	9,5	42,5	5,5	20,5	4,5	0,8	0,2	44,5	5,5
	CH	37,5	11,5	71,0	17,0	43,0	15,0	1,1	0,3	51,5	5,5
	ML	33,5	10,5	43,5	5,5	13,0	5,0	1,0	0,2	49,5	5,5
	MH	44,5	10,5	67,5	13,5	28,0	10,0	1,3	0,3	54,5	4,5

Zona	Tipo de suelo	Contenido de humedad		Límite líquido		Índice de plasticidad		Razón de vacíos		Porosidad	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
Lat	CL	23,0	9,0	41,5	5,5	18,5	4,5	0,8	0,2	43,0	6,0
	CH	38,5	12,5	72,0	16,0	43,0	14,0	1,1	0,3	52,0	6,0
	ML	31,0	9,0	43,0	5,0	12,5	3,5	0,9	0,2	48,0	5,0
	MH	40,5	10,5	67,0	11,0	26,5	8,5	1,2	0,3	53,5	4,5
V2	ML	47,5	9,5	40,5	4,5	10,0	4,0	1,3	0,2	56,0	4,0
	MH	83,5	20,5	79,5	20,5	19,5	7,5	2,1	0,5	67,0	5,0
V2w	MH	103,5	48,5	126,5	46,5	41,0	20,0	2,5	1,0	69,0	9,0
V3	CL	31,5	7,5	43,0	5,0	19,0	4,0	1,0	0,2	48,5	4,5
	CH	40,0	9,0	67,5	14,5	39,0	12,0	1,1	0,2	53,0	4,0
	ML	38,0	8,0	44,5	4,5	14,0	4,0	1,1	0,2	52,0	4,0
	MH	50,5	15,5	66,5	13,5	23,0	7,0	1,4	0,4	57,0	5,0
V3w	MH	70,0	29,0	89,0	28,0	27,5	11,5	1,8	0,6	62,5	7,5

Fuente [8].

Guanacaste, Puntarenas y Limón

Para estas provincias se realizó una zonificación preliminar de las tres provincias, considerando los cambios en las propiedades físicas del suelo por su ubicación, condiciones climáticas y geología. Para las condiciones climáticas, se utilizaron los mapas de precipitación promedio anual y evapotranspiración promedio anual establecidos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) [17], como se presenta en la Figura 15 (Pacífico Norte), Figura 16 (Pacífico Central), Figura. 17 (Pacífico Sur) y Figura 18 (Vertiente del Caribe).

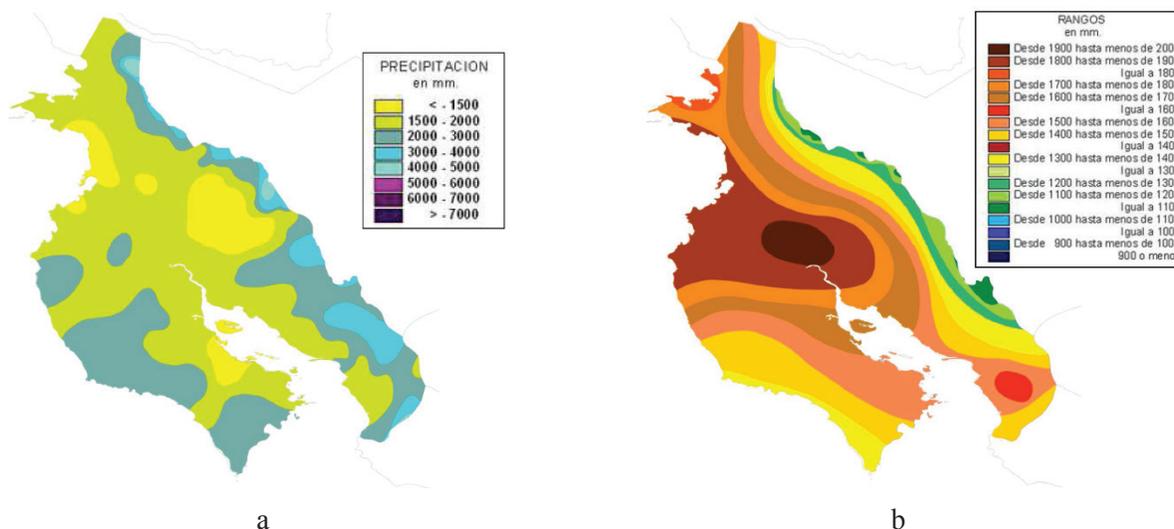


Figura 15. Mapas de precipitación (a) y evapotranspiración (b) anuales de la región Pacífico Norte. Fuente: [18]

Con respecto a la geología de la zona, se usó el mapa de zonificación geotécnica que se presenta en el Código de Cimentaciones de Costa Rica [13]. Es importante mencionar que, dependiendo de los resultados obtenidos estadísticamente, puede ser valorada la posibilidad de que estas zonas pudieran no coincidir luego de la revisión de datos. Se establecieron las siguientes zonas preliminarmente, mostradas en el cuadro 5.

Cuadro 5. Descripción de la zonificación según aspectos geológicos e hidrológicos de las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Provincia	Zona	Descripción
Guanacaste	Liberia - Papagayo	Presenta formación rocosa de poca profundidad, baja precipitación y alta evapotranspiración (1500 mm – 2000 mm). Abarca las zonas de Liberia, la Guardia y Papagayo.
	Santa Cruz	Predominan los suelos residuales y puede haber suelos expansivos, tiene valores extremos de evapotranspiración y baja precipitación. Abarca las zonas de Filadelfia, Tamarindo, Playa Flamingo y Santa Cruz.
	Nicoya – Tilarán	Presenta los valores de precipitación anual más altos de la zona (2000 mm – 3000 mm) y el de menor evapotranspiración. Abarca las zonas de Tilarán y Nicoya.
Puntarenas	Pacífico Norte	Normalmente tiene precipitaciones entre 2000 mm y 3000 mm, su evapotranspiración es la más elevada (1400 mm – 1700 mm), y predomina suelos residuales.
	Pacífico Central	Su precipitación anual se encuentra entre 3000 mm y 5000 mm, su evapotranspiración desde 900 mm hasta 1400 mm, y presenta suelos aluviales.
	Pacífico Sur	Presenta la misma precipitación que la zona Pacífico Central, pero cuenta con menos evapotranspiración anual que esta misma zona, y predominan los suelos residuales.
Limón	Moín – Limón Centro	Presenta precipitación anual mayor a 2500 mm en las zonas más secas, su evapotranspiración no supera los 1200 mm anuales, y cuenta con suelos residuales.
	Guácimo – Matina	Tiene las mismas condiciones de precipitación y evapotranspiración que la zona Moín – Limón Centro, pero presenta suelos aluviales.

Fuente: [9]

Una vez definida la zonificación, se procesaron las propiedades geotécnicas para obtener los parámetros estadísticos. Primero, se trabajó el grado de saturación, en el cuadro 6 se presentan los resultados obtenidos. La provincia de Limón presenta los mayores valores de grado de saturación del suelo, lo cual es consistente con los patrones de mayor precipitación anual y menor evapotranspiración de las tres áreas geográficas analizadas. Por otro lado, el valor promedio del grado de saturación que se presenta en la zona Liberia – Papagayo donde hay muy poca precipitación anual y alta evapotranspiración, presenta los valores más bajos.

Cuadro 6. Valores de promedio y desviación estándar del grado de saturación.

Provincia	Zona	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
Guanacaste	Liberia – Papagayo	69,07	13,15
	Santa Cruz	78,08	13,82
	Nicoya – Tilarán	90,52	8,28
Puntarenas	Pacífico Norte	83,49	13,47
	Pacífico Central	86,34	10,06
	Pacífico Sur	86,92	11,08
Limón	General	95,99	7,52
	Moín – Limón Centro	93,91	7,43
	Guácimo – Matina	98,94	6,63

Fuente: [9].

Para los parámetros estadísticos de la cohesión no drenada y del peso unitario total de estas zonas, se dividió en los tipos de suelos encontrados en la zona por medio de pruebas de hipótesis de comparación de promedios, por lo que hay zonas en las que se pudieron clasificar el suelo específicamente y en otras se obtuvo un resultado más general. Los valores analizados se presentan en el cuadro 7.

Cuadro 7. Valores de promedio y desviación estándar de la cohesión no drenada y peso unitario total para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Provincia	Tipo de suelo	Zona	Cohesión (ton/m ²)		Peso unitario total (ton/m ³)	
			\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
Guanacaste	Limo	Liberia – Papagayo	6,31	3,94	1,73	0,05
		Nicoya – Tilarán			1,68	0,03
	Limo arenoso	Liberia – Papagayo	8,14	3,19	1,73	0,04
		Santa Cruz			1,78	0,03
		Nicoya – Tilarán			1,75	0,05
	Limo arenoso arcilloso	7,08	5,44	1,84	0,21	
	Limo arcilloso	4,41	3,27	1,75	0,05	
	Limo arcilloso arenoso	6,61	3,86	1,78	0,02	
	Arcilla	7,74	4,48	1,78	0,02	
	Arcilla arenosa			1,78	0,04	
Arcilla limosa	1,69			0,03		
Puntarenas	Limo	6,38	3,94	1,77	0,03	
	Arcilla	6,38	4,98	1,76	0,05	
Limón	Limo	Moín – Limón Centro	3,93	2,48	1,63	0,07
		Guácimo – Matina			1,76	0,04
	Arcilla	6,30	3,81	1,77	0,04	
	Restos de arcilla			1,74	0,11	

Fuente: [9].

Por último, como los resultados de ángulo de fricción efectivo en la zona de Guanacaste y Puntarenas llegan a ser muy similares, se unificaron estas dos provincias, y se subdividieron en Pacífico Norte, Central y Sur. Los resultados se muestran en el cuadro 8 , y se puede decir que, aunque los valores promedios son muy similares entre sí, las desviaciones estándar llegan a variar considerablemente.

Cuadro 8. Valores promedio y desviación estándar del ángulo de fricción efectivo para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Provincia	Zona	Promedio (°)	Desviación estándar (°)
Guanacaste y Puntarenas	Pacífico Norte	25,40	4,02
	Pacífico Central	27,49	5,15
	Pacífico Sur	25,64	6,68
Limón	Moín – Limón Centro	26,24	3,31
	Guácimo - Matina	24,62	4,61

Fuente: [9]

Heredia y Alajuela

De igual manera que para las provincias de San José y Cartago, se aplicó el método geoespacial para crear una base de datos, utilizando la zonificación geotécnica de la GAM y General que se encuentra en el Código de Cimentaciones de Costa Rica y que fue establecida por Bogantes [14] [15]. La Figura 19 muestra un mapa con los puntos georreferenciados en las provincias de Heredia, Alajuela, San José y Cartago. Se aprecia que se da una concentración considerable de las perforaciones en la Gran Área Metropolitana (GAM), mientras que hay puntos segregados en los cantones norteños.

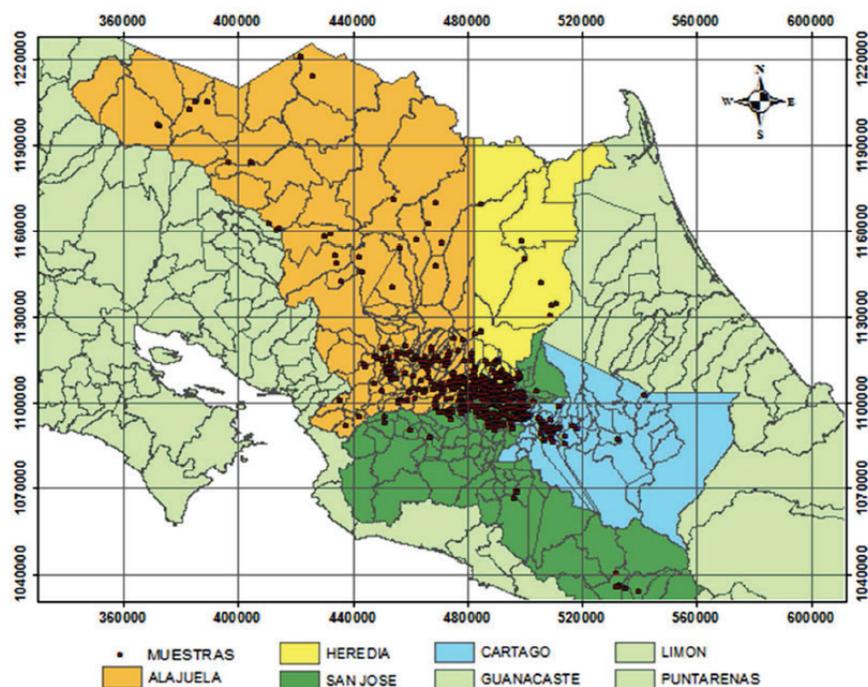


Figura 19. Ubicación de las muestras de suelo en las provincias de Heredia, Alajuela, San José y Cartago. Fuente: [18]

Igual al caso de San José y Cartago, se redujo la zona de interés considerando solo los datos de la GAM ya que los demás son pocos y se encuentran esparcidos. Además, se descartaron los puntos que no contaban con información de su ubicación, por lo que al final se utilizaron 1567 datos en el análisis. La georreferenciación de los puntos se observa en la figura 20.

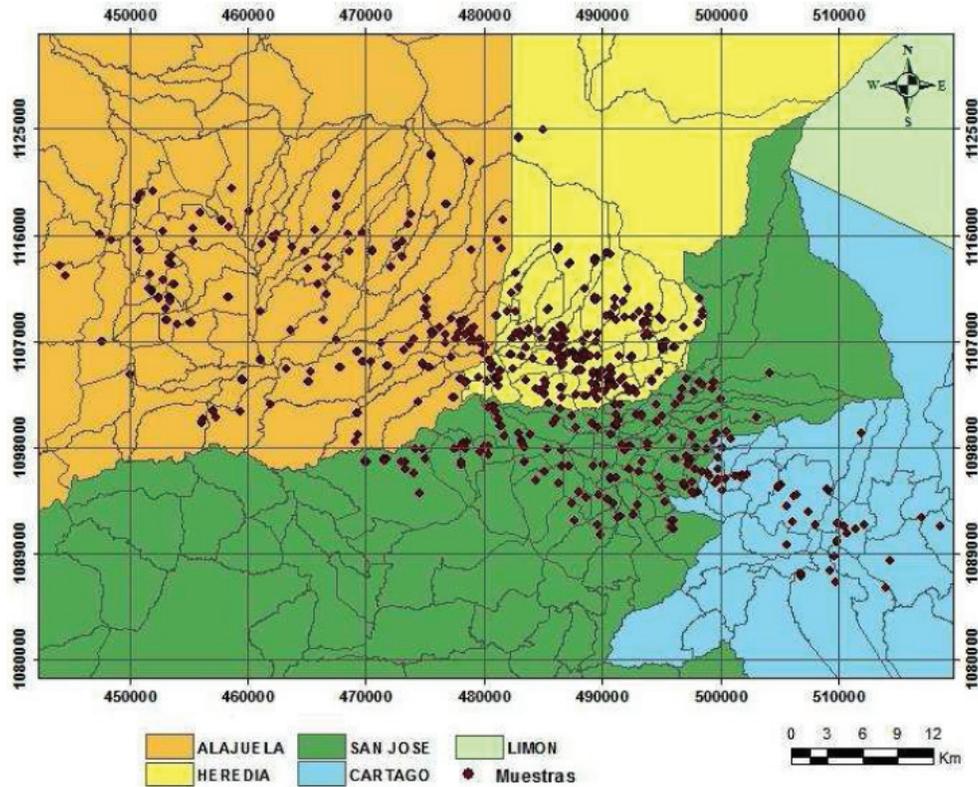


Figura 20. Distribución de las muestras en la Gran Área Metropolitana. Fuente: [18]

Adicionalmente, se agruparon zonas con características geotécnicas similares que contaban con pocos puntos para poder realizar un análisis estadístico. Esta agrupación de zonas se basó en el origen geológico, consistencia del suelo y problemas asociados al mismo por el comportamiento mecánico. Las descripciones de las zonas consideradas se muestran en el cuadro 9. En la Figura 21 se visualiza un mapa de las zonas determinadas para la base de datos en la GAM, tomando en cuenta los datos obtenidos para las provincias de Heredia y Alajuela. En general, predomina el grupo B, G y la zona 5.

Cuadro 9. Descripciones del suelo en la zonificación de la GAM y de la hoja San José y San Carlos del CCCR.

Tipo de mapa	Grupo	Zonas	Descripción
Zonificación geotécnica de la GAM	A	4, 28, 29,31	Suelos transportados derivados de abanicos aluviales, de 10 m a 15 m de espesor, de consistencia intermedia. Se clasifica tipo MH, pero se pueden encontrar estratos CH. Para estructuras pesadas puede haber asentamientos por la alta plasticidad en el suelo.
	B	9,21, 26	Suelos generados por la meteorización de lavas o ignimbrita, con espesores mayores a 10 m, de consistencia intermedia. Se encuentra principalmente suelos tipo MH, y se debe verificar los asentamientos para estructuras pesadas.
	C	14, 15, 16	Suelos blandos tipo MH y CH generados por la alteración de lavas, de consistencia blanda en capas superiores. Puede haber asentamientos por la alta plasticidad en el suelo. Puede haber problemas de filtraciones por la presencia de nivel freático superficial
	D	1, 7, 11, 13, 17, 20	Suelos transportados derivados de depósitos piroclásticos, son profundos, principalmente MH, ML o CL, de consistencia blanda, propensos al colapso, con baja capacidad soportante y problemas de filtración por un nivel freático superficial.
	E	2, 3, 8	Suelos blandos transportados de origen piroclásticos, principalmente tipo MH, con espesores entre 10 m y 15 m, con problemas de cimentación por baja capacidad soportante y asentamientos.
	F	12, 19	Suelos transportados de origen piroclástico, se encuentran limos y arcillas subsuperficiales, con alto potencial de expansión, con problemas de suelos colapsables (limos), pero con buena capacidad soportante que mejora al reducir el espesor del suelo.
	G	6, 30, 32, 33	Arcillas, con alto potencial de expansión, de espesor variable, de consistencia intermedia, adecuados para efectos de cimentación.
	5		Suelos de origen residual por meteorización de rocas ígneas y sedimentarias, tipo MH o ML, con espesores menores a 5 m, con condiciones de cimentación favorable por ser suelos de consistencia dura.
	22		Suelos transportados de origen piroclástico, con espesor variable, tipo MH y CH, con problemas de baja capacidad soportante y asentamientos.
	25		Suelos residuales generados por la meteorización de la colada de lava Los Ángeles, roca muy cerca de la superficie, principalmente tipo MH, con buena capacidad soportante.
	27		Suelos residuales derivados de ignimbrita, poco espesor, de consistencia sura, con problemas graves de expansión por arcillas superficiales, poco permeables.
Zonificación geotécnica general de Costa Rica	Am		Suelos residuales de color amarillento
	Lat		Suelos residuales rojizos
	V2		Suelos volcánicos con gran contenido de minerales amórficos
	V2w		Suelo volcánicos con gran contenido de minerales amórficos en zonas húmedas
	V3		Suelos residuales de origen volcánico
	V3w		Suelos residuales de origen volcánico en zonas húmedas

Fuente: [13].

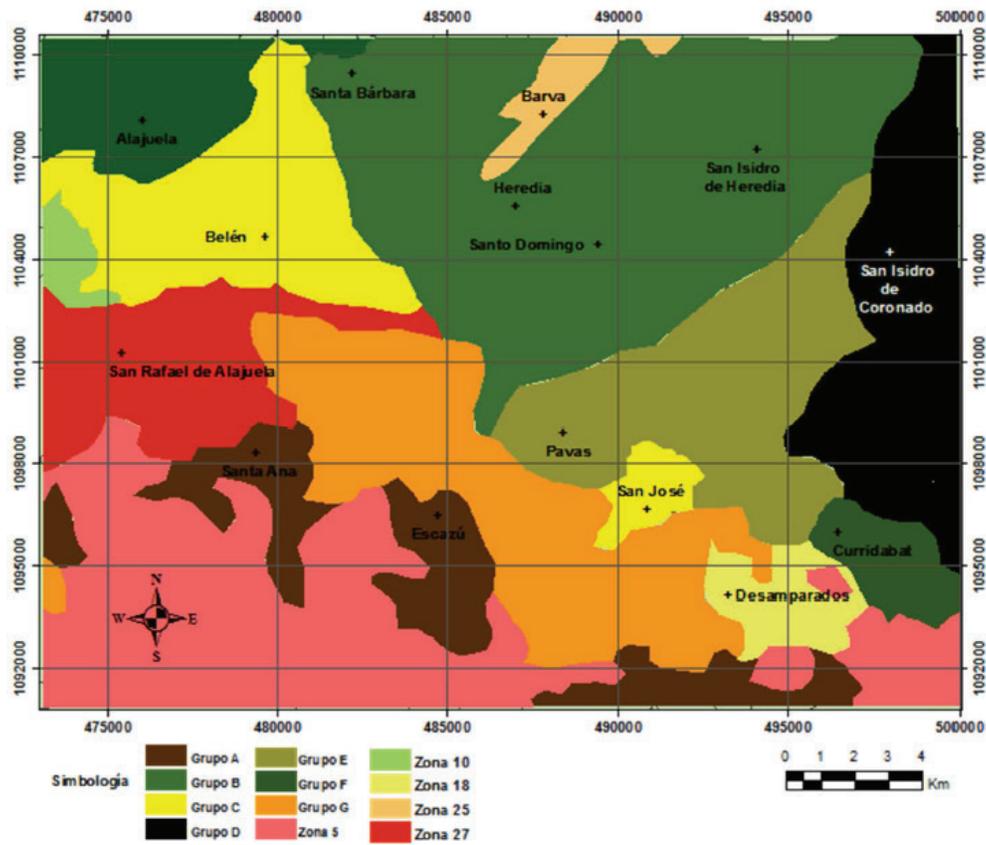


Figura 21. Mapa de las zonas de estudio determinadas para las GAM. Fuente: [18]

Una vez analizados los datos, se obtuvieron los promedios y las desviaciones estándar para la cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación de los suelos encontrados en las provincias de Heredia y Alajuela (cuadro 10). Asimismo, se obtuvo esta información para el contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, relación de vacíos y porosidad del suelo, la cual se muestra en el cuadro 11.

Cuadro 10. Valores de promedio y desviación estándar de la cohesión no drenada, peso unitario total y grado de saturación para las provincias de Heredia y Alajuela.

Grupo/Zona	Tipo de suelo	Cohesión (ton/m ²)		Peso unitario total (ton/m ³)		Saturación (%)	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
A	CL	11,8	5,4	1,90	0,05	73,4	10,4
	CH	11,5	6,5	1,80	0,05	89,2	6,4
	MH	10,5	6,1	1,76	0,05	93,9	3,7
B	MH	9,0	5,7	1,73	0,07	96,5	3,5
	ML	8,3	4,6	1,77	0,04	93,4	4,2
	CH	10,6	7,0	1,77	0,05	95,5	4,4
	CL	10,6	6,8	1,83	0,04	88,3	6,45
C	MH	7,1	4,5	1,72	0,07	96,8	3,25
	ML	5,4	3,9	1,78	0,05	91,4	7,3
	CH	13,0	6,5	1,79	0,06	93,1	6,95
D	MH	8,7	6,3	1,68	0,06	97,9	2,1
	ML	4,8	2,9	1,73	0,04	96,9	3,15
E	MH	10,3	6,3	1,75	0,04	95,7	4,1
	ML	9,2	6,2	1,78	0,04	92,2	4,6
	CL	8,5	7	1,79	0,03	90,2	4,1
F	ML	6,8	5,3	1,75	0,05	95,1	4,3
	MH	8,8	5,9	1,75	0,05	95,2	4,9
G	CL	10,8	7,3	1,85	0,05	82,3	8,8
	CH	8,5	6,5	1,78	0,07	91,9	8,1
	MH	8,4	5,3	1,76	0,05	94,2	4,8
5	CH	8,6	5,0	1,80	0,06	88,5	8,2
	ML	8,4	4,8	1,81	0,07	88,7	8,6
	MH	9,0	5,6	1,77	0,07	92,3	5,2
22	MH	7,9	4,6	1,73	0,06	97,2	2,8
	CH	8,5	6,5	1,78	0,06	98,0	2,0
	CL	10,8	7,3	1,85	0,06	92,0	2,5
25	MH	6,6	4,5	1,67	0,10	97,0	3,0
27	MH	8,3	4,5	1,75	0,06	95,3	3,6
	ML	9,4	6,3	1,80	0,06	88,7	7,4
	CH	13,3	6,7	1,80	0,07	90,3	9,65
	CL	9,8	4,8	1,85	0,04	82,2	6,75
Am	MH	8,2	5,2	1,75	0,06	95,5	4,4
	CL	9,4	6,7	1,81	0,07	88,2	8,4
	CH	9,9	6,3	1,78	0,07	91,1	7,6
	CL	9,7	5,5	1,86	0,06	90,2	10,0
Lat	MH	9,3	5,7	1,77	0,05	93,9	5,2
	ML	10,2	5,5	1,82	0,05	86,4	8,3
	CH	9,6	5,6	1,78	0,07	91,7	8,6
	CL	11,8	7,7	1,88	0,07	77,0	12,7
V2	MH	5,4	3,2	1,58	0,10	99,7	0,35
	ML	4	2,5	1,73	0,04	96,4	3,65
V2w	MH	5,6	4,5	1,52	0,17	99,2	0,80
V3	MH	8,6	5,7	1,71	0,08	96,6	3,4
	ML	8,1	5,8	1,77	0,05	92,6	5,8
	CH	9,4	6,0	1,77	0,05	93,9	5,2
	CL	10,2	6,6	1,82	0,05	88,0	6,3
V3w	MH	7,3	5,5	1,63	0,14	95,6	4,4

Cuadro 11. Valores de promedio y desviación estándar del contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, relación de vacíos y porosidad para las provincias de Heredia y Alajuela.

Zona	Tipo de suelo	Contenido de humedad		Límite líquido		Límite plástico		Razón de vacíos		Porosidad	
		\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x	\bar{x}	s_x
A	CL	19,6	6,1	42,3	4,9	22,1	2,4	0,7	0,1	40,8	4,6
	CH	34,2	10,1	65,8	14,3	27,6	3,6	1,0	0,2	49,8	4,9
	MH	41,9	13,6	60,9	9,5	36,6	6,5	1,2	0,3	53,5	4,7
B	CL	31,1	6,4	45,8	3,1	25,9	1,3	0,9	0,1	48,4	3,9
	CH	41,5	7,7	72,2	18,2	30,5	4,3	1,2	0,2	53,7	3,6
	ML	38,9	6,2	46,4	3,0	31,6	3,3	1,1	0,1	52,5	3,1
C	MH	47,9	13,1	64,9	14,4	41,3	10,8	1,3	0,3	56,1	4,6
	CH	38,3	9,4	64,3	7,7	29,2	2,9	1,1	0,2	52,0	4,9
	ML	37,0	9,3	44,4	5,0	29,5	1,9	1,1	0,2	51,3	4,9
D	MH	48,3	11,4	66,2	9,7	41,0	7,5	1,3	0,2	56,4	4,4
	ML	46,6	8,3	41,4	4,2	31,2	3,9	1,3	0,2	55,9	3,4
	MH	60,9	17,9	66,0	11,1	45,9	12,5	1,6	0,4	60,6	5,6
E	CL	34,0	5,0	42,3	3,4	24,6	1,4	1,0	0,1	50,1	2,8
	ML	37,2	6,6	44,9	3,8	30,7	3,6	1,1	0,1	51,7	3,4
	MH	44,0	8,7	57,1	4,7	37,4	5,0	1,2	0,2	54,7	3,8
F	ML	43,6	10,2	40,2	6,0	28,9	2,9	1,2	0,2	54,5	4,4
	MH	43,8	10,3	62,7	8,0	39,1	8,2	1,2	0,2	54,5	4,5
G	CL	26,6	8,8	41,8	5,4	23,0	1,8	0,9	0,2	45,5	5,3
	CH	38,8	11,2	72,2	17,0	28,2	3,3	1,1	0,2	52,1	5,8
	MH	41,5	10,0	64,8	12,4	36,9	6,9	1,2	0,2	53,5	4,3
5	CH	34,4	12,8	67,3	13,2	28,9	4,2	1,0	0,3	49,7	6,2
	ML	34,0	12,1	41,9	6,3	30,3	4,4	1,0	0,3	49,6	6,0
	MH	40,4	16,1	60,6	9,2	35,8	6,9	1,1	0,3	52,6	5,9
22	MH	49,5	10,6	70,4	14,5	46,8	10,2	1,3	0,2	56,9	4,1
25	MH	59,5	18,7	76,9	17,2	56,0	17,6	1,6	0,4	60,0	6,3
27	CL	25,7	6,2	42,4	4,5	23,0	2,4	0,8	0,1	45,1	3,9
	CH	36,1	12,1	68,2	17,8	29,5	3,7	1,1	0,3	50,6	6,5
	ML	33,8	11,9	46,0	4,8	31,5	4,1	1,0	0,3	49,5	5,5
	MH	43,6	11,0	65,0	9,7	39,9	10,0	1,2	0,2	54,5	4,3
Am	CL	25,1	9,5	42,7	5,7	22,4	2,2	0,8	0,2	44,4	5,7
	CH	37,5	11,6	71,3	17,1	28,7	4,2	1,1	0,3	51,3	5,7
	ML	33,3	10,5	43,2	5,3	30,4	3,4	1,0	0,2	49,2	5,6
	MH	44,5	10,9	67,8	13,6	39,7	7,4	1,2	0,2	54,8	4,5
Lat	CL	22,8	9,2	41,5	5,4	22,7	5,4	0,8	0,2	42,8	6,2
	CH	38,4	12,2	71,7	15,9	28,8	3,7	1,1	0,3	51,7	6,1
	ML	30,7	8,8	42,9	5,4	30,5	4,2	0,9	0,2	48,0	5,1
	MH	40,8	10,4	67,0	11,3	40,7	7,9	1,2	0,2	53,2	4,5
V2	ML	47,3	9,4	40,6	4,7	30,6	3,8	1,3	0,2	56,1	4,0
	MH	83,1	20,6	79,8	20,4	60,0	18,6	2,1	0,4	66,7	5,0
V2w	MH	103,9	48,5	125,9	46,2	85,2	35,0	2,5	1,0	68,9	9,2
V3	CL	31,7	7,6	43,1	4,7	23,8	2,7	1,0	0,2	28,2	24,7
	CH	40,1	8,9	67,4	14,1	28,4	4,6	1,1	0,2	52,9	4,2
	ML	38,2	8,1	44,8	4,3	30,6	4,3	1,1	0,2	52,1	4,1
	MH	50,9	15,6	66,6	13,6	43,5	12,1	1,4	0,3	57,1	5,3
V3w	MH	68,7	28,9	86,7	29,3	60,3	23,6	1,8	0,7	62,1	7,3

Conclusiones

La posibilidad de contar con estadísticos para la cohesión no drenada, el ángulo de fricción efectivo, el peso unitario total y el grado de saturación, posibilita la utilización de análisis y diseños probabilísticos para estructuras geotécnicas cuando no se cuenta con suficiente cantidad de datos. La utilización de un enfoque probabilístico permite cuantificar de mejor forma la incertidumbre asociada a los materiales geotécnicos.

Para obtener la base de datos estadísticos de los suelos en Costa Rica, se aplicaron dos métodos de análisis que se denominaron como geoespacial y geoestadístico para poder diferenciar los diferentes enfoques utilizados, aunque está claro que ambos toman en cuenta criterios geoespaciales y geoestadísticos. Se concluyó que ambos métodos son exitosos en la obtención de los resultados a partir de los datos analizados. Sin embargo, llega a ser más específico el denominado método geoespacial porque en este análisis se tomó en cuenta la zonificación geotécnica establecida en el Código de Cimentaciones de Costa Rica. En cambio, para el método llamado en este trabajo geoestadístico, se obtuvieron zonas más generalizadas con los mapas climatológicos del Instituto Meteorológico Nacional, por lo que se puede generalizar el comportamiento y las propiedades del suelo en las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón.

Adicionalmente, se obtuvo información para más propiedades geotécnicas en las provincias de San José, Cartago, Heredia y Alajuela, tales como: contenido de humedad, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, razón de vacíos y porosidad. Con estos datos se puede llegar a comparar los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para algún proyecto ubicado en estos lugares. Además, para las provincias de Guanacaste, Puntarenas y Limón se obtuvieron los parámetros estadísticos para el ángulo de fricción efectivo para las zonas donde se encuentra suelo granular.

Es necesario notar que para las provincias de San José, Cartago, Heredia y Alajuela el análisis efectuado consideró solo los puntos recolectados de la GAM, por lo que puede haber áreas, donde es posible que los estadísticos presentados no representen adecuadamente las condiciones in situ.

Si bien es cierto se recomienda utilizar los valores de desviación estándar presentados para poder realizar análisis y diseños probabilísticos donde el profesional especialista así lo considere, no es aconsejable sustituir una adecuada investigación geotécnica por los valores promedio acá presentados. Los valores promedios deben limitarse a brindar información complementaria que el especialista en ingeniería geotécnica puede valorar en sus análisis.

Agradecimientos

Este trabajo no se habría podido realizar en su totalidad sin la colaboración de los ingenieros Kenneth Arce, Alejandro Bravo y Erick Valverde desarrollando diferentes secciones del proyecto. También de gran importancia fue la compilación de información realizada por la ingeniera Silvia Brizuela. Es especialmente relevante la asesoría técnica brindada durante la fase de análisis de datos por los especialistas el Doctor Rafael Arce de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica, y la Máster Andrea Collado Chaves especialista en estadística y profesora de la Escuela de Economía de la Universidad de Costa Rica. No menos importante es la colaboración de los asistentes del Laboratorio de Medios No Saturados (LabUnsat) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

Referencias

- [1] L. Abramson, T. Lee y G. Boyce, *Slope Stability and stabilization methods*, 2da ed, New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [2] G. Mostyn y K. Li, "Probabilistic slope analysis-State-of-play", *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. Taylor and Francis, 1993.
- [3] J. Briaud, *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*, 2da ed, New York: John Wiley and Sons, 2023.
- [4] M. Dianty, A. Yahaya y F. Ahmad, "Probability Distribution of Engineering Properties of Soil at Telecommunication Sites in Indonesia". *International Journal of Scientific Research in Knowledge*. 2(3), pp.143-150, 2014.
- [5] US Army Corps of Engineers, *Engineering and Design: Slope Stability*, Washington D.C., EM 1110-2-1902, 2003.
- [6] Y. Wang, T. Zhao y Z. Cao, "Site-specific probability distribution of geotechnical properties". *Computer and Geotechnics*, Volumen 70, pp. 159-168, 2015.
- [7] M. Nazarzadeh y S. Sarbishee-ee, "Effect of Uncertainty of Soil Influence on Shallow Foundations". *Open Journal of Geology*. Vol. 7, No. 5, 2017.
- [8] E. Valverde, "Proyecto de graduación. Diseño probabilístico de cimentaciones profundas cuantificando la incertidumbre asociada al grado de saturación en San José y Cartago," San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [9] A. Bravo, "Proyecto de graduación. Diseño probabilístico de cimentaciones superficiales cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación de los suelos de Guanacaste, Puntarenas y Limón". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2013.
- [10] K. Acuña Chaves, "Proyecto de graduación. Análisis probabilístico de estabilidad de taludes cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación del suelo, aplicado a suelos de Alajuela y Heredia". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2012.
- [11] G. Laporte y S. Sáenz, "Métodos aproximados de cálculo por consolidación de limos compresibles aplicables a Costa Rica". III Seminario Nacional de Geotecnia. San José, 1985.
- [12] D. Castillo, "Proyecto de graduación. Normalización del ensayo SPT en Costa Rica". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1994.
- [13] Asociación Costarricense de Geotecnia, *Código de Cimentaciones de Costa Rica*, Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2009
- [14] G. Bogantes, "Proyecto de graduación. Propuesta de zonificación geotécnica para el área metropolitana". San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1999.
- [15] G. Bogantes, "Zonificación Geotécnica General de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos". VIII Seminario Nacional de Geotecnia y III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, 2002, pp. 159-181.
- [16] J. Bowles, *Foundations Analysis and Design*, 5^{ta} ed, Illinois: McGraw - Hill International Editions, 1997.
- [17] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN), *Atlas Climatológico de Costa Rica [Versión digital]*. San José, Costa Rica, 2009.
- [18] S. Brizuela, "Proyecto de graduación. Diseño de un programa computacional para el análisis probabilístico de cimentaciones superficiales y muros de retención". San José: Universidad de Costa Rica, 2016.