



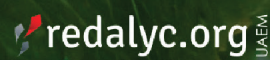
TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Enero - Marzo 2023
Volumen 36-1
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

<https://unsplash.com/photos/ib762TCsqKg>

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 36-1. Enero-Marzo,
2023 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



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



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

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

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

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

Publicación y directorio en catálogos



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Capacidad productiva de un fertilizante orgánico elaborado a partir de residuos sólidos para el cultivo de lechuga Productivity of organic fertilizer based on solid wastes for lettuce cultivation <i>Rooel Campos-Rodríguez, Angélica Torres-Contreras, Ana Gabriela Castro-Brenes, Rubén Calderón-Cerdas</i>	3
Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias Methodology for the implementation of photovoltaic systems with storage for small industries <i>Carlos Alberto Bolaños-Jiménez, Gustavo Gómez-Ramírez</i>	18
Primer informe sobre heteroblastia en protofilas de tacaco (<i>Sechium tacaco</i>) First report on heteroblasty in tacaco (<i>Sechium tacaco</i>) protophylls <i>José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	33
Uso de regresión de soporte vectorial para el control de espuma metálica Using support vector regression for metal foam control <i>Alexis Sanabria-Castro, Marcela Meneses-Guzmán, Bruno Chiné-Polito</i>	42
Efecto inhibitorio del aceite esencial de <i>Lippia graveolens</i> sobre <i>Fusarium oxysporum</i> en la familia <i>Solanaceae</i> . Una revisión Inhibitory effect of <i>Lippia graveolens</i> essential oil on <i>Fusarium oxysporum</i> in the <i>Solanaceae</i> family. A review <i>Laura Daniela Albarracín-Gómez, Stefany Hortua-Gamboa, Jovana Acero-Godoy</i>	54
Simulación de plasma y diseño de sistemas para operación y diagnóstico en el Tokamak esférico MEDUSA-CR Plasma Simulation and system design for operation and diagnosis in the spherical Tokamak MEDUSA-CR <i>Luis Alonso Araya-Solano, Arnoldo Ramírez-Jiménez, Ricardo Solano-Piedra, José Esteban Pérez-Hidalgo, Iván Vargas-Blanco, Marvin Hernández-Cisneros</i>	66
Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical Atmospheric corrosion of low carbon steel, at different exposure angles, in a tropical environment <i>Ronald Jiménez-Salas, Ronald Brenes-Brenes, Javier Rodríguez-Yañez, Jean Sanabria-Chinchilla</i>	76

Efecto de zonas agroecológicas y condición de siembra sobre altura de planta y rendimiento en avena forrajera en la región Puno, Perú

Effect of agroecological zones and planting condition on plant height and yield in forage oats in the Puno region, Perú
Julio Cesar Zeballos-Cabana, William Leoncio Carrasco- Chilon, Héctor Vladimir Vásquez-Pérez..... 89

Aplicaciones Biotecnológicas de la Degradación Bioquímica de Madera por acción de Hongos Xilófagos: Pudrición Parda y Blanca/ Biotechnological

Applications behind Biochemical Wood Degradation by Xylophagous Fungi: Brown and White Rot
Catalina Mena-Morales, Camila Morales-Rodríguez, Itnan Vargas-Venegas, Brayán Villalobos-Quintanilla, Víctor Víquez-Muñoz..... 97

Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica

Evaluation of the ICA-NSF Water Quality Index in the micro-basins of the Río Dulce National Park as a tool in the comprehensive management of sustainable management, Livingston, Izabal, Guatemala, Central America
José Adiel Robledo-Hernández..... 106

Desarrollo del ciclo de vida y comparación de la fertilidad de *Estigmene albida* aislada del cultivo del higo (*Ficus carica*), bajo condiciones controladas de laboratorio

Life cycle development and comparison of the fertility of *Estigmene albida* isolated from fig crop (*Ficus carica*), under controlled laboratory conditions
Alexander Schmidt-Durán, Randall Chacón-Cerdas 117

Chemical risk: state of the art of chemical substances exposure assessment

Riesgo químico: estado del arte sobre la evaluación a la exposición de sustancias químicas
Jose Carlos Mora-Barrantes, Karla Alfaro-Aguilar, Melany Murillo-Chaverri, Marielia Calderón-Quesada, Ana Julia González-Marín 130

Análisis energético del edificio N°1 de la Universidad Tecnológica de Panamá: simulación y optimización del consumo de energía eléctrica a través de soluciones de eficiencia energética

Energy analysis of building N°1 of the Technological University of Panama: simulation and optimization of electrical energy consumption through energy efficiency solutions
Constantino Gollini-Mihalopoulos, Aránzazu Berbey-Alvarez, Félix Henríquez..... 140

Desarrollo de Plataforma UAS de Ala Fija con ascenso/descenso vertical para aplicaciones fotogramétricas

Development of Vertical Takeoff and Landing fixed-wing UAS Platform for Photogrammetry Applications
Kenny Lee-Quirós, Juan Gabriel Rodríguez-Rivera, Amit Ferencz-Appel, Sergio Arriola-Valverde, Jorge Umaña-Soto, Renato Rimolo-Donadio..... 152

Importancia de los coeficientes de uniformidad en las operaciones agrícolas asistidas por maquinaria (Nota técnica)

Importance of uniformity coefficients in machine-assisted agricultural operations (technical note)
Natalia Gomez-Calderón, Fernando Watson-Hernández, Milton Solórzano-Quintana..... 163

Capacidad productiva de un fertilizante orgánico elaborado a partir de residuos sólidos para el cultivo de lechuga

Productivity of organic fertilizer based on solid wastes for lettuce cultivation

Rooel Campos-Rodríguez¹, Angélica Torres-Contreras²,
Ana Gabriela Castro-Brenes³, Rubén Calderón-Cerdas⁴

Fecha de recepción: 12 de agosto, 2021
Fecha de aprobación: 24 de enero, 2022

Campos-Rodríguez, R; Torres-Contreras, A; Castro-Brenes, A.G; Calderón-Cerdas, R Capacidad productiva de un fertilizante orgánico elaborado a partir de residuos sólidos para el cultivo de lechuga. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 3-17.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5823>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr
- 2 Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.
Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: angelicatc19@gmail.com
- 3 Ingeniería en Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: gaby96cb@gmail.com
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: racalderon@tec.ac.cr

Palabras clave

Residuos sólidos biodegradables; Takakura; fertilización de lechuga; fertilización química.

Resumen

El aumento en la generación de residuos, como consecuencia del incremento poblacional, provoca la búsqueda de alternativas que permitan un manejo y disposición de los residuos. En esta investigación, se comparó la fertilización química y orgánica a partir de sustratos obtenidos de residuos sólidos de un centro educativo de secundaria para el cultivo de lechuga. Para la comparación de insumos químicos y orgánicos, se estableció un experimento segregados por tres tratamientos: orgánico, químico y un testigo sin fertilización. Durante un periodo de tiempo de siete semanas, se evaluó número de hojas, diámetro de la planta, diámetro del tallo altura de tallo, peso seco raíz, peso seco de lechuga, contenido relativo de agua (CRA) y el color. Como resultados, se obtuvo que ningún tratamiento presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) para cada una de las variables evaluadas. Sugiriendo ello, que un fertilizante orgánico aplicado a una dosis que contemple los niveles de elementos en suelo y de las necesidades del cultivo, puede ser igualmente productivo que un sistema químico. Esto con la subsecuente disminución de gases de efecto invernadero y contaminación del agua, suelo y aire.

Keywords

Biodegradable solid waste; Takakura; lettuce fertilizer; chemical fertilization.

Abstract

The increase in the generation of waste, as a consequence of the population increase, provokes the search for alternatives that allow the management and disposal of waste. In this research, chemical and organic fertilization was compared from substrates obtained from solid waste from a secondary school for growing lettuce. For the comparison of chemical and organic inputs, an experiment segregated by three treatments is established: organic, chemical and a control without fertilization. During a period of seven weeks, the number of leaves, plant diameter, stem diameter, stem height, root dry weight, lettuce dry weight, relative water content (RCA) and the color. As results, it was obtained that no treatment presented significant differences ($p > 0.05$) for each of the variables evaluated. This suggests that an organic fertilizer applied at a dose that considers the levels of elements in the soil and the needs of the crop, can be equally productive as a chemical system. This with the subsequent decrease in greenhouse gases and pollution of water, soil and air.

Introducción

Alrededor de un 30 a 40% de los alimentos producidos a nivel mundial se pierde y desperdicia, causando impacto a nivel social, ambiental y económico. En el ámbito social, la problemática se debe a que no se aprovechan alimentos saludables y suficientes para la población que lo necesita. A nivel ambiental, se disponen de recursos como agua, tierra, suelo y energía para su producción y en relación con el aspecto económico, el problema se debe a los costos asociados y a la falta de percepción de ingresos [1].

De acuerdo con [2 y 3], si se mantiene el patrón de crecimiento poblacional, para el 2050, será necesario aumentar un 70% de la producción de alimentos a nivel mundial. El crecimiento poblacional exige una mayor cantidad de producción de alimentos, es importante que haya un equilibrio entre la producción agraria y el ambiente. Como parte de las acciones que ha

desarrollado Costa Rica, el 13 de julio de 2010, se aprobó la Ley 8839, la cual propone que ejecute una gestión integral de los residuos y un uso adecuado de los recursos a través de una planificación y acciones regulatorias, administrativas, financieras, operativas y ambientales [4]. Esta ley constituye una herramienta de apoyo, para tratar de resolver la problemática de los residuos sólidos que se generan en Costa Rica.

Entre las alternativas que permiten una mejor gestión ambiental, es importante considerar las estrategias de la economía circular y la jerarquía de gestión de residuos. Allí, se busca reducir las entradas a los procesos productivos y aprovechar los residuos que se deriven de las actividades [5]. La valorización de los residuos orgánicos, además de contribuir con la protección del ambiente también permite minimizar las especies en condición de plagas y disminuye las enfermedades en las plantas [6]. Un manejo adecuado de los residuos sólidos orgánicos, a través del compostaje es una alternativa viable, para el manejo de la fracción orgánica. La producción de alimentos bajo sistemas más sostenibles es un desafío para muchos productores, pues los fertilizantes sintéticos, son fáciles de adquirir, existe una gran cantidad de información con respecto al uso. No obstante, en algunas regiones, el uso excesivo de químicos ha generado un desequilibrio en el suelo, contaminación de aguas subterráneas y suelo, además de consecuencias en la salud de la población [7]. En el caso de los abonos orgánicos, estos actúan de forma más lenta e indirecta, pero ayudan a la estructura del suelo, mejoran la textura y además incrementa la capacidad para retener nutrientes, liberándolos de forma progresiva de acuerdo con la demanda de la planta [8]. De acuerdo con [9], en Costa Rica, la generación de residuos sólidos biodegradables es de alrededor de un 44 a 52% del total de residuos sólidos que se generan. El manejo y aprovechamiento de los residuos orgánicos representa un reto para las municipalidades y gobiernos locales. Si se disponen con los demás residuos, se da la presencia de insectos vectores de enfermedades, lixiviados, olores desagradables y gases de efecto invernadero, que causan daños inminentes al ambiente [6]. Evitar que se depositen residuos valorizables a rellenos sanitarios o vertederos, permite el desarrollo de una gran cantidad de alternativas y opciones de ingreso para una localidad. El compostaje de residuos sólidos biodegradables es una alternativa que permite estabilizar los residuos, además durante el proceso, se logran eliminar diferentes tipos de microorganismos patógenos y sustancias orgánicas tóxicas [10]. Por tanto, con el compostaje es posible el aprovechamiento de los nutrientes que poseen los residuos sólidos orgánicos, para utilizarlo en las actividades agrícolas.

El método de compostaje Takakura, es una alternativa que se puede adaptar a diferentes escenarios, los cuales pueden ser a nivel institucional, doméstico y comunitario. Esta técnica utiliza microorganismos fermentativos para la degradación del material orgánico, permite obtener el abono en poco tiempo, en espacios reducidos y además es seguro, económico y eficiente [11].

El objetivo de la presente investigación fue verificar que un fertilizante orgánico es capaz de igualar el rendimiento de la producción utilizando un insumo químico.

Metodología

El experimento tuvo un diseño de bloques completos al azar, tres tratamientos y tres repeticiones. La unidad experimental fue una parcela de lechuga de 1 m². Esta prueba fue realizada en el Campo de Prácticas Docentes e Investigaciones Agropecuarias del Instituto Tecnológico de Costa Rica, provincia de Cartago.

El experimento consistió en la siembra de plantas de lechuga con diferentes tipos de fertilización. Un tratamiento correspondió al uso de un fertilizante orgánico elaborado a partir de residuos orgánicos a través del proceso de compostaje Takakura. Un segundo tratamiento, fue un testigo absoluto. En este testigo absoluto, no se aplicó fertilizante y la fuente de nutrientes para la planta fue la propia fertilidad del suelo. El último de los tratamientos fue una formulación química.

Cabe destacar que previo a la siembra de las plantas, se realizó un análisis químico del suelo, esto con el objetivo de conocer la concentración de algunos nutrientes esenciales. El muestreo para el análisis de suelos se realizó 28 días previo a la siembra. Para el análisis se utilizó la solución extractora KCl-Olsen. Además, se realizó un análisis químico para conocer el contenido mineral del fertilizante Takakura. Posterior al análisis realizado al suelo y al abono Takakura, se elaboró un plan de fertilización, empatando para ello, los requerimientos del cultivo y la fertilidad del suelo.

La fertilización del cultivo se basó en un rendimiento esperado de 40 toneladas por hectárea. Para el fertilizante se utilizó un porcentaje de eficiencia de nitrógeno (60), fósforo (40), potasio (70), magnesio (75), azufre (50), calcio (75), boro (50) y zinc (50).

Se calculó en gramos, la cantidad de insumos químicos y abono orgánico Takakura en cada tratamiento. En el caso de la fertilización química se empleó 9,77 gramos por planta, los insumos que se emplearon para lograr la fórmula requerida fueron 15-3-31, 18-5-15, 10-30-10 y nitrato de calcio. En cuanto al abono orgánico Takakura se utilizó 159 gramos por planta.

Variables

Se evaluó el número de hojas de manera semanal. Para ello, se realizó un conteo de las hojas visibles por planta. El conteo se hizo en nueve plantas por cada unidad experimental. Estas plantas fueron seleccionadas al azar. También, para estas mismas 9 plantas se midió el diámetro en dos puntos de la planta, en dos sentidos, uno ecuatorial y otro meridional. Los valores fueron expresados en centímetros, para obtener el valor final. Adicional a ello, se midió el diámetro del tallo, justo en la base del mismo.

Se evaluó el Contenido Relativo de Agua (CRA), este se determinó al momento de cosecha, donde se obtuvo el peso fresco (PF). Luego, se colocaron las lechugas en una bolsa plástica, a las cuales se les colocó papel absorbente húmedo en el fondo, para posteriormente, colocarlas en una hielera que contenía hielo en el fondo. Este proceso se llevó a cabo por un periodo de dos horas, de esta forma se obtuvo el peso túrgido (PT). Finalmente, para obtener el peso seco (PS), se colocó las muestras en una estufa por 80°C durante 72 horas, luego se ubicaron en una balanza de precisión, con una incertidumbre de 0,01 g. El cálculo del contenido relativo de agua se obtuvo a través de la siguiente ecuación.

$$CRA = \frac{PF - PS}{PT - PS} \times 100$$

Fórmula 1. Contenido Relativo de Agua (CRA).

Además, se midió el peso de las raíces. Para ello, se extrajo la raíz a una profundidad de 10 cm, se utilizó un barreno el cual se colocó a una inclinación de 30°. Luego, se colocó la muestra en un colador y se lavó para eliminar el suelo y que quedaran las raíces. Posteriormente, se pesó

en una balanza de precisión, con una incertidumbre de 0,01 g. Para obtener el peso seco, se colocó la raíz en una estufa por 80°C durante 24 horas, se pesó en una balanza analítica, con una incertidumbre de 0,001 g.

Para tomar el dato de la altura del tallo, se dividió la planta en dos y se procedió a colocar medir desde la base del tallo hasta al ápice vegetativo de la planta.

Una variable importante en el experimento fue la compactación del suelo. La teoría sugiere que la materia orgánica confiere una disminución a la densidad aparente del suelo. Para determinar la compactación del suelo, se utilizó un penetrómetro marca DICKEY - John, el cual se insertó al suelo con una presión de 7,03 kgf/cm². La profundidad que alcanzó el instrumento se consideró como el nivel de compactación que tenía ese suelo. Se utilizó una cinta métrica para medir la profundidad de la penetración, y así obtener el dato de compactación. En este caso, por tratamiento se tomaron nueve datos por unidad experimental.

Finalmente, se valoró la coloración de las plantas, se utilizó una escala pictórica con valores del 1 al 5, desde amarillo a verde oscuro respectivamente. Para determinar el color de las lechugas en cada uno de los tratamientos, se consideró la opinión de cinco personas seleccionadas al azar quienes fungieron como panelistas, se les brindó una matriz con un patrón para que aplicaran la escala de Likert y de esa forma se evaluar el color para los diferentes tratamientos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Patrón utilizado para la aplicación de la escala Likert en la medición del color de las lechugas evaluadas por tratamiento

Escala	Puntuación máxima	Intervalo	Tonalidad
5	25	21 a 25	verde oscuro
4	20	16 a 15	verde claro
3	15	11 a 15	verde amarillento
2	10	6 a 10	verde amarillo
1	5	1 a 5	Amarillo

Fuente: [12].

La cantidad de plantas consideradas en el estudio fueron 17 por cada tratamiento. A cada uno de los participantes se les brindó un documento que mostraba la escala de color y el patrón utilizado para la evaluación. Las labores descritas anteriormente, se llevaron a cabo el día de cosecha.

Resultados y discusión

El resultado del análisis químico realizado mostró que el pH del suelo obtuvo un valor de 5,8. Según [27], el valor óptimo para el crecimiento de plantas esta entre 5,7-6,5, por lo que el resultado obtenido se encuentra dentro de límite aceptable. En cuanto a la acidez intercambiable, el resultado del estudio de suelo fue de 0,2 Cmol (+) /L. Para [39], el valor óptimo de acidez intercambiable debe ser menor a 0,3 Cmol (+) /L, valores más altos pueden ocasionar problemas moderados de crecimiento. El porcentaje de saturación de acidez (%SA), reportado fue de 2, según lo mencionado por [39], cuando el %SA es menor a 10 se considera óptimo. En cuanto al contenido de bases intercambiables, se obtuvo que la suma de bases tuvo un valor de 9,39 Cmol (+) /L. Entre mayor sea el valor de Ca, K y Mg, existe mayor fertilidad en el suelo. Además, la suma de las bases menor a 5 Cmol (+) /L es considera baja.

En el caso del estudio la suma de bases fue mayor a 5 Cmol (+) /L [40]. De este parámetro se afirma que los cuatro análisis realizados, se encuentran dentro de los parámetros considerados como una adecuada fertilidad, por lo que esto confirma que las plantas de lechuga tuvieron la disponibilidad adecuada de nutrientes que les permitió un desarrollo óptimo.

En cuanto a las relaciones catiónicas, los parámetros utilizados para la interpretación de los datos fueron los que sugiere [41]. Los valores obtenidos en este estudio fueron los siguientes: Ca/Mg: 2,79, dicho valor al ser mayor que 2 está catalogado como ideal. En cuanto a la relación Ca/K, el valor fue de 7,80 y al ser menor que 30 indica que es adecuado. Mg/K con un valor obtenido de 2,80 sugiere que es aceptable ya que está dentro del parámetro de 1-3. Finalmente, la relación (Ca+Mg) /K obtuvo un valor de 10,59, que indica que es adecuado. Por lo que, en este aspecto todas las relaciones catiónicas estuvieron dentro de los límites aceptados para un adecuado desarrollo del cultivo.

El nivel de fósforo en el suelo presentó un valor muy alto con 65 mg/L que equivale a 130 kg/ha, teniendo en cuenta la extracción del cultivo de lechuga, se tuvo que la cantidad que posee el suelo es suficiente para abastecer 8 veces un cultivo. Por otra parte, el K, Mg y Ca, también presentaron valores superiores a los requeridos, en el caso del Ca se tuvo un valor de 2480 kg/ha, que representó 12 veces más. El Mg tuvo un valor de 528 kg/ha, que significó 49,35 veces más de la extracción del cultivo. El valor de K fue de 616 kg/ha, lo que representó 3,85 veces más.

Los valores obtenidos fueron los siguientes para otros elementos como el Fe fue de 51 mg/L, Cu: 7 mg/L, Zn: 4 mg/L y Mn: 32 mg/L. De acuerdo con [42], los límites óptimos para los elementos anteriores son: Fe:10-100 mg/L, Cu: 2-20 mg/L, Zn: 2-10mg/L y Mn: 5-50 mg/L. Por lo tanto, los elementos hierro, cobre, zinc y manganeso, se encontraron dentro del parámetro establecidos como óptimos.

Condiciones climáticas durante el ensayo

Las condiciones agroclimáticas, presentadas durante el desarrollo del cultivo, contribuyeron con el crecimiento de las lechugas. La temperatura mínima promedio durante los 49 días del cultivo fue de 16°C y la máxima de 23°C, según la temperatura mínima debe estar entre 15-18 °C y la máxima en 18-24°C, por lo tanto, la temperatura estuvo dentro de los valores óptimos. La humedad relativa en promedio estuvo entre 68-73%, se considera como ideal valores entre 60-80% [43].

Número de hojas

La variable de número de hojas no presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). La cantidad de hojas aumentó cada semana y alcanzó un valor de 29 hojas por planta. La cantidad de hojas fue creciente.

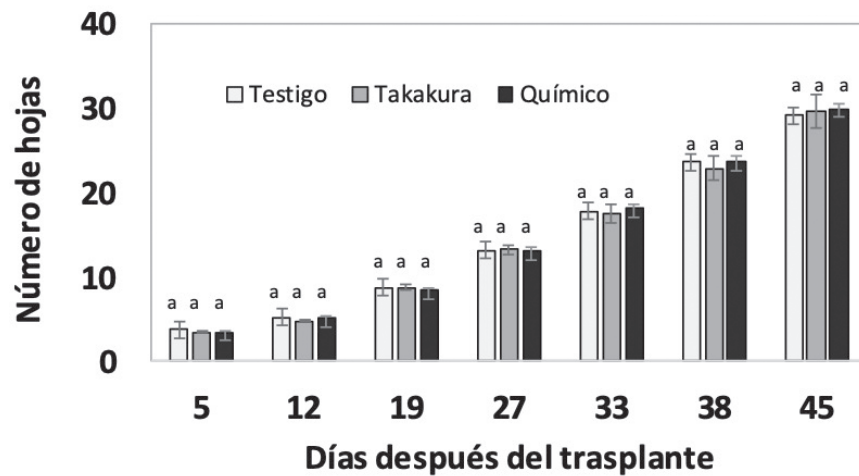


Figura 1. Número de hojas de las plantas de lechuga a lo largo de las 7 semanas del ensayo. Valores con la misma letra no poseen diferencias significativas (n=27)

Como se muestra en la figura 1, el número de hojas al momento de la cosecha fue de 29,2 para el tratamiento testigo, 29,6 para Takakura y 29,9 para el de fertilización química. Un estudio realizado por [13], halló 20 hojas de lechuga luego de 60 días posteriores a la siembra en tratamiento químico, así como 24 hojas por planta en tratamiento orgánico. Además [14], en un estudio realizado a campo abierto utilizando un tratamiento testigo y diferentes concentraciones de estiércol de lombriz, encontró valores para el número de hojas por planta que van desde 9,98 (testigo) hasta 27,1 utilizando 174 gramos de estiércol de lombriz. Por tanto, la cantidad de hojas por planta obtenidas en esta investigación evidencia que, el valor fue superior a otras investigaciones similares realizadas. El número de hojas demuestra que, las plantas de los tres tratamientos tuvieron un adecuado suministro de nutrientes que permitió un óptimo crecimiento.

Diámetro de la planta

El diámetro de la planta no mostró diferencias entre los tratamientos. No obstante, la variable sí presentó un aumento desde el día 5 hasta el 45. En promedio los valores obtenidos al momento de la cosecha fueron: testigo con 23,8 cm, Takakura 25,8 cm y químico con un valor de 26, cm (figura 2). El dato más alto se obtuvo, el día 45 con el tratamiento Takakura con un valor de 31,4 cm.

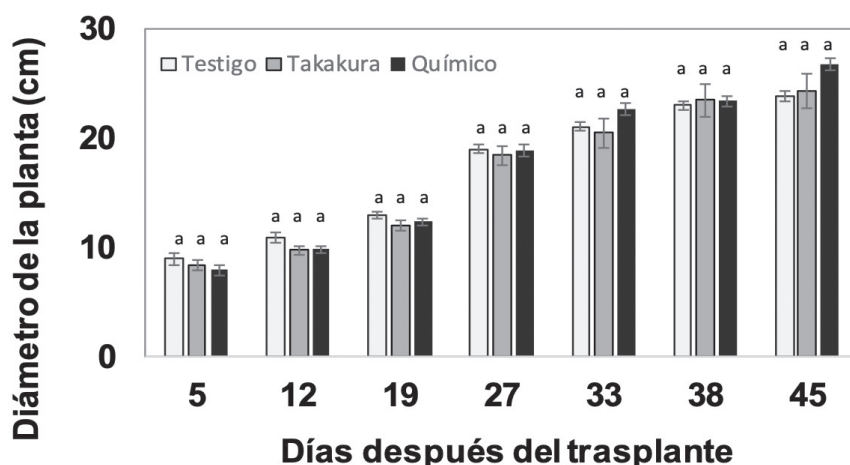


Figura 2. Diámetro de las plantas creciendo con diferentes fuentes de fertilizantes. Valores con la misma letra no poseen diferencias significativas (n=27).

De acuerdo con [15], en una evaluación realizada en San Carlos utilizando diferentes variedades de lechuga americana, en campo abierto con fertilización química, se encontró que en promedio al momento de la cosecha el diámetro fue de 25,1 cm. En otra investigación realizada por [16], obtuvo resultados que van de los 17,07 cm en campo abierto hasta los 20,33 cm con sistema de macrotúneles y fertilizantes químicos. Otro estudio realizado bajo ambiente controlado con fertilización química muestra datos que van desde los 34,7 a 41,5 cm [17]. Los datos obtenidos en este estudio coinciden con otras investigaciones que se desarrollaron a campo abierto. No obstante, los que se realizaron bajo un sistema de ambiente protegido, mostraron datos más altos que los de esta investigación. Puede deberse a diversos factores entre los que destaca los ambientales. De acuerdo con [16], en el caso del cultivo a campo abierto, la humedad relativa suele estar entre valores de 70 a 80% y en ambiente protegido entre 45 a 55% y sugieren que cuando la humedad del aire es alta, la planta tiene una menor transpiración y esto reduce el transporte de los nutrientes de las raíces a las hojas.

Diámetro del tallo

En relación con el diámetro del tallo, se observa en la figura 3, que entre los diferentes días en que se realizó las mediciones, si se observa un crecimiento de forma exponencial entre un día y otro después del trasplante. Sin embargo, entre cada día evaluado no se encontró diferencias estadísticamente significativas. El día 45, correspondiente a la cosecha, los promedios del diámetro del tallo fueron: tratamiento testigo 2,86 cm, Takakura 3,10 cm y fertilización química 3,06 cm.

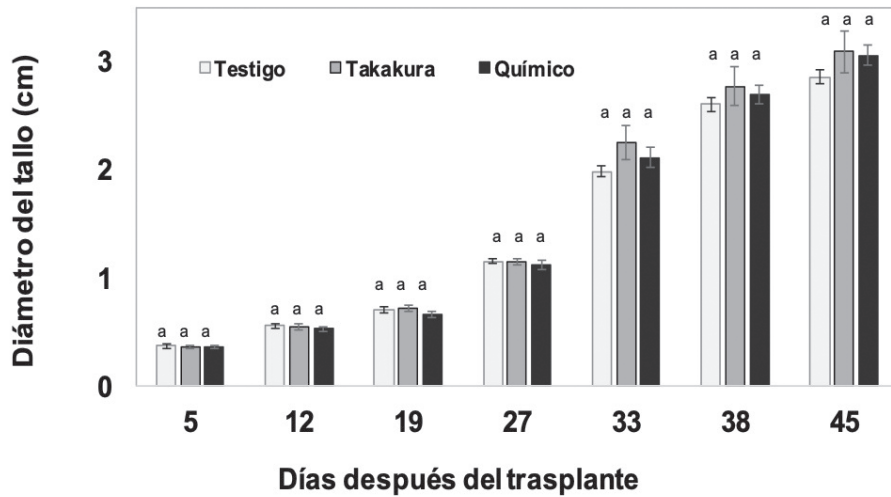


Figura 3. Diámetro del tallo. Valores con la misma letra no poseen diferencias significativas (n=27).

Los datos obtenidos en esta investigación difieren a los que se generaron por [13], ya que, a los 45 días los autores hallaron que el dato promedio del diámetro del tallo para el tratamiento testigo fue de 3 cm, con insumos orgánicos 5,5 cm y con fertilización química 5 cm. De acuerdo con [18], las diferencias de diámetro de tallo se relacionan con la densidad de siembra. En el caso del presente estudio, todas las unidades experimentales tuvieron la misma densidad de siembra. Esto se evidencia con la evaluación estadística realizada, que comprueba que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos.

Contenido Relativo de Agua

El contenido relativo de agua no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). Como se muestra en la figura 4, los datos reportados en promedio por tratamiento fueron: testigo 95%, Takakura 97% y químico 95%.

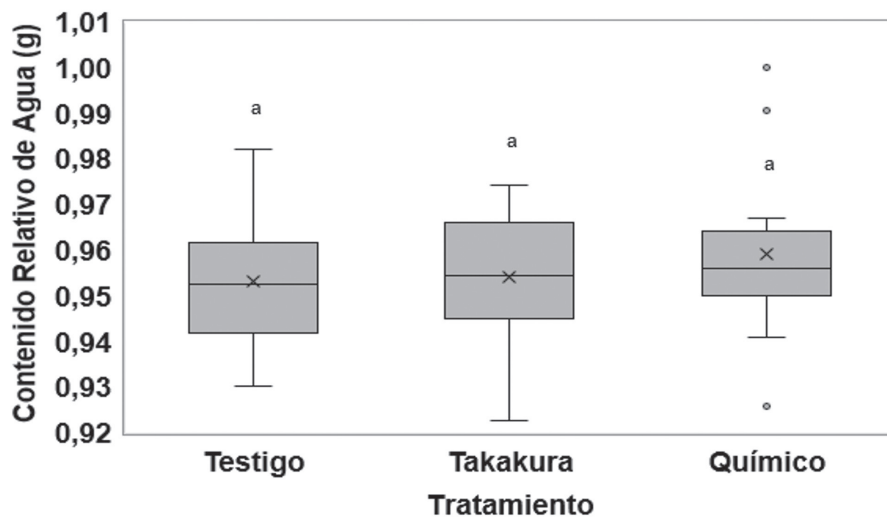


Figura 4. Contenido relativo de agua en las plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). Valores con la misma letra no poseen diferencias significativo (n=27).

Según [19], encontraron que un cultivo con un adecuado riego, el CRA rondó el 92,1%, mientras que, bajo condiciones de estrés, el valor fue de 66,7%. Por otra parte, en una evaluación del contenido relativo de agua en función del estrés hídrico, realizada por [20], mencionan que el CRA disminuyó cuando hubo déficit de agua. En esta investigación, el cultivo nunca presentó sequía, pues el período en el que se desarrolló correspondió a la época lluviosa del país. Además, al momento de la cosecha, no se evidenció marchitamiento ni otros síntomas visibles relacionados con déficit hídrico. Los altos valores de CRA obtenidos en este estudio, muestran una menor pérdida de agua de las estomas y/o una mayor absorción de agua por las raíces de las plantas [20].

Peso seco lechuga y raíz

En relación con el peso de la lechuga y la raíz, no se encontró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. En el peso seco de la lechuga, el promedio del tratamiento testigo reportó el valor de 11,44 gramos, Takakura 11,60 gramos y finalmente con fertilización química se obtuvo 12,63 gramos. El dato más alto y el más bajo reportado, se obtuvo con el tratamiento Takakura, por lo que fue el que presentó la mayor dispersión (figura 5). En cuanto al peso seco raíz, los valores promedio de los tratamientos fueron: testigo 0,19 gramos, Takakura con 0,10 gramos y químico 0,16 gramos. En la figura 5 se observa que el valor más alto se registró con el tratamiento testigo y el dato más bajo con el Takakura. La relación entre las dos variables no fue directamente proporcional, ya que, en el caso del peso seco de la lechuga, el valor más alto se registró con el tratamiento químico, seguido del Takakura y luego el testigo. El valor promedio más alto de peso seco de raíz se obtuvo con el tratamiento testigo, seguido del químico y finalmente el de Takakura.

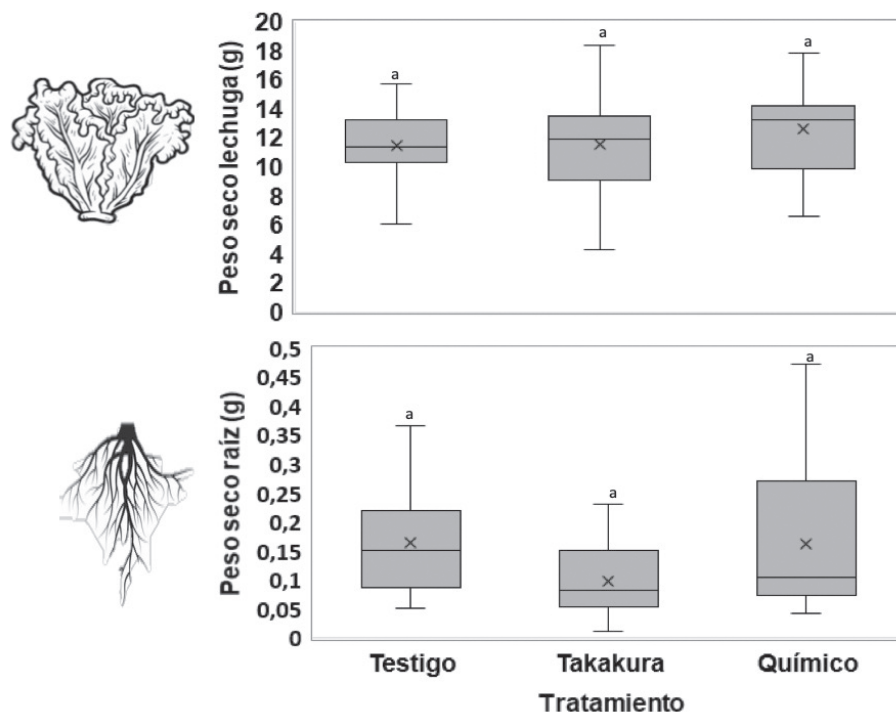


Figura 5. Peso seco lechuga (g) y peso seco raíz (g). Valores con la misma letra no poseen diferencias significativas.

Los valores promedios obtenidos en el peso seco de la lechuga difieren a los obtenidos por [13], en un estudio realizado para evaluar los efectos del crecimiento y el rendimiento de la lechuga, en condiciones de campo utilizando diferentes tipos de fertilización. El dato reportado por dichos autores a los 45 días, para el tratamiento testigo fue de 0,85 gramos, con insumos orgánicos 1,05 gramos y con fertilización química 1,05 gramos. La razón por la que se evidencia valores altos en esta variable se debe a que de acuerdo con [21], el peso seco de la lechuga es un parámetro predictivo de alta disponibilidad de nutrientes para las plantas. Es decir, que en esta investigación el cultivo, tuvo los nutrientes disponibles, para un óptimo desarrollo. En lo referente al peso seco de la raíz, la razón por la que no se encontraron diferencias significativas, se relacionó con el tipo de suelo (arcilloso), que posee el lugar donde se desarrolló el estudio. Pues, de acuerdo con lo mencionado por [22], las plantas requieren de nutrientes minerales que adquieren del suelo en forma de iones y estos se encuentran disueltos en el agua y se absorben por medio de las raíces. El suelo arcilloso tiene una capacidad de intercambio catiónico considerado alto, por lo que las cargas son muy fuertes y la disponibilidad de iones es mayor [23]. Por tanto, los resultados obtenidos coinciden con el hecho de que el suelo contaba con todas las características necesarias para nutrir el cultivo de forma idónea.

Altura de tallo

Los valores obtenidos en promedio a los 45 días, para las alturas de tallo fueron los siguientes: testigo 4,58 cm, Takakura 5,29 cm y químico 4,94 cm. Los resultados derivados en esta investigación son mayores a los reportados por [24], donde el valor fue de 3,22 cm para un estudio realizado utilizando cinco variedades de lechuga americana con fertilización química y ambiente protegido. Otra investigación [25], sugiere que la altura del tallo se inhibe por la alta intensidad de la luz en zonas altas. El periodo en el que se llevó a cabo el estudio coincide con la época en que hubo una menor intensidad luminosa (mayo a noviembre) en el lugar donde se desarrolló el cultivo [26]. Por otra parte, [27] considera que la altitud máxima para que el cultivo de lechuga se desarrolle de forma óptima es hasta los 2800 msnm, la zona donde se cultivó la lechuga posee una altitud menor con 1360 msnm [28]. Por tanto, la altura de tallo no se vio afectado por factores abióticos y esto permitió el crecimiento del tallo de forma adecuada.

Compactación del suelo

Los valores de profundidad de compactación obtenidos en esta investigación no fueron significativos a nivel estadístico ($p > 0,05$). Los valores promedio fueron: tratamiento testigo 14,28 cm, Takakura 16,98 cm y fertilización química 14,28 cm. El valor más alto lo reportó el tratamiento Takakura con una profundidad máxima de 19,2 cm, mientras que el más bajo correspondió al químico con 10,5 cm (figura 6).

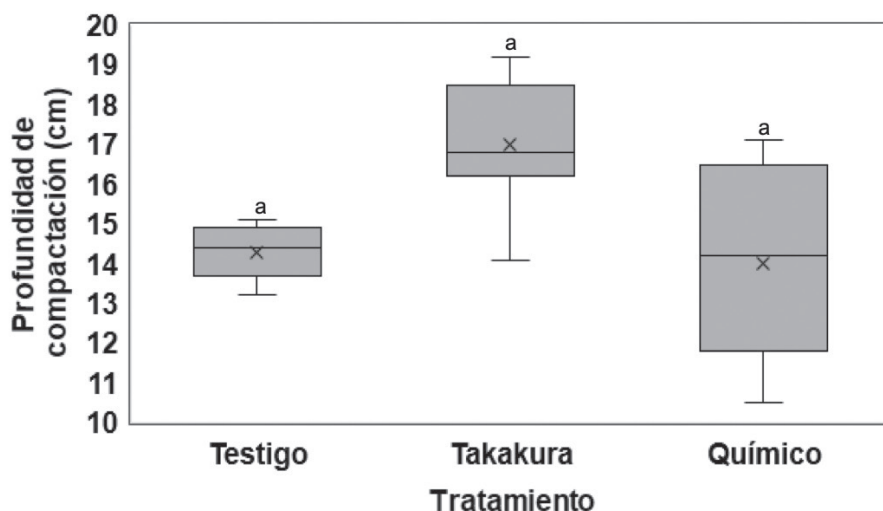


Figura 6. Profundidad de compactación. Valores con la misma letra no poseen diferencias significativo.

La razón por la que no hubo diferencias entre tratamientos se atribuye principalmente al tipo de suelo, porque de acuerdo con lo mencionado por [29], el tipo de suelo arcilloso posee tensiones capilares que forman grumos y por ende se dificulta la compactación.

Color

El análisis estadístico realizado a la determinación del color muestra que no hubo diferencias significativas en esta variable, para los diferentes tratamientos realizados. Los resultados promedio por tratamiento fueron: tratamiento testigo con 17,82 que corresponde a verde claro, Takakura con un valor de 21,17 catalogado como verde oscuro, finalmente el tratamiento químico con un valor de 21,06 que también se encuentra dentro de lo establecido como verde oscuro (figura 7).

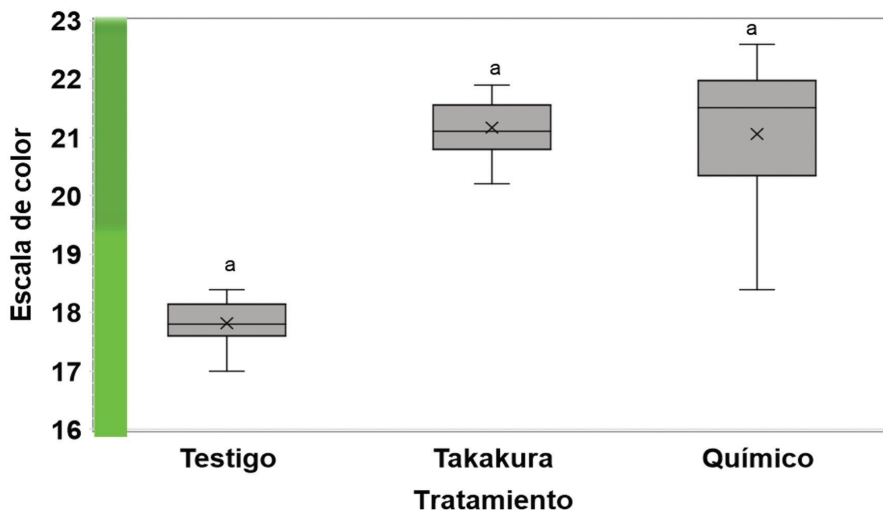


Figura 7. Evaluación de color. Valores con la misma letra no poseen diferencias significativo.

De acuerdo con [30], los grados de color verde de las hojas pueden variar desde claros a oscuros, se considera que cuando una lechuga posee color verde oscuro es de calidad. Asimismo, el alto contenido de color verde obtenido en el estudio demuestra que los tratamientos presentaron un alto contenido de clorofila [31] y que el proceso de fotosíntesis se llevó a cabo de forma óptima, ya que las lechugas lograron absorber suficiente energía lumínica que se evidenció a través del color de las plantas.

Conclusiones

Con un adecuado uso de los resultados de un análisis de suelo, su interpretación y la capacidad de generar un plan de fertilización, se puede lograr que un cultivo crezca de igual manera que con fertilización química. En general, un adecuado plan de fertilización, que siga los requerimientos nutricionales de los cultivos, permite disminuir el desperdicio de fertilizantes. Además, la producción de fertilizantes orgánicos a partir de residuos vegetales, es una clara opción para mitigar los altos precios de los fertilizantes químicos, promoviendo un uso cíclico de los recursos, una disminución de la huella de carbono y la emisión de gases de efecto invernadero. Los fertilizantes orgánicos proveen de nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos.

Referencias

- [1] Organización mundial para la Alimentación y la Agricultura. El futuro de la alimentación y la agricultura: tendencias y desafíos.2007 Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-i6881s.pdf>
- [2] Organización de las Naciones Unidas y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. La agricultura mundial en la perspectiva del año 50. (2009) Obtenido de http://www.fao.org/filead-min/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- [3] Organización mundial para la Alimentación y la Agricultura. Mejora de la fertilidad del suelo. 2009 Obtenido de <https://www.iaea.org/es/temas/mejora-de-la-fertilidad-del-suelo>
- [4] Asamblea Legislativa. LEY PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS. Universidad de Costa Rica. 2010 Obtenido de https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68300&nValor3=83024&strTipM=TC#ddown
- [5] G, Wehenpohl, & C,Hernández. Guía para la Elaboración de Planes Maestros para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. En E. y. SEMANART. México: 1 ed. 2006.
- [6] MAGRAMA. Gestión de biorresiduos de competencia municipal. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.2013 Obtenido de http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/guia_mo_def_tcm7-285227.pdf
- [7] B, Añez, & W, Espinoza. Fertilización química y orgánica. Revista Forestal Venezolana, 46(2), 47-49. 2002. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/16b0/9524f84a0a276bea74a97b8079393cd83713.pdf>
- [8] Fundación MCCH. (2010). Fertilización orgánica. Fundación Maquita Cushunchic, Quito, Ecuador. Obtenido de <http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/3061/fertilizacionmcch.pdf>
- [9] R. Campos-Rodríguez, L. P. Brenes-Peralta, y M. F. Jiménez-Morales, «Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras», TM, vol. 29, n.º 8, pp. pág. 25–32, dic. 2016.
- [10] A, Vilches, D,Pérez,J, Toscano, & O, Macías. Lucha contra la contaminación. Organización de Estados Iberoamericanos 2014.
- [11] IGES. Compostaje para la Reducción de Residuos. Institute for Global Environmental Strategies 2009. Obtenido de https://www.jica.go.jp/kyushu/office/ku57pq000009v1mc-att/comp_kit_low.pdf
- [12] RAMIREZ-RAMIREZ, Fiorella; CAMPOS-RODRIGUEZ, Roel; JIMENEZ-MORALES, María Fernanda and BRENES-PERALTA, Laura. Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guácimo, Limón, Costa Rica. Tecnología en Marcha [online]. 2016, vol.29, suppl.5, pp.14-24. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i8.2981>.

- [13] S, Islam, A, Ahmed,S, Mahmud, T, Tusher & S, Khanom. Effects of organic fertilizer on the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) used as vegetables. *International Journal of Agricultural Science and Research* , 2(3), 116-128. 2012 Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/232321766_Effects_of_organic_fertilizer_on_the_growth_and_yield_of_lettuce_Lactuca_sativa_L_used_as_vegetables
- [14] V,Cali. Efecto del estiércol de lombriz en cuatro cultivares de lechuga. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Riobamba. 2011 Obtenido de <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/974/1/13T0719%20.pdf>
- [15] J, Vásques. EVALUACIÓN AGRONÓMICA DE CINCO VARIEDADES DE LECHUGA (*Lactuca sativa* L.) EN TRES CICLOS DE SIEMBRA CONSECUTIVOS, EN SAN MIGUEL DE LA TIGRA, SAN CARLOS, ALAJUELA, C.R. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Agronomía, San Carlos. 2015 Obtenido de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6469/evaluacion_agronomica_cinco_variedades_lechuga.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [16] P, Velázquez, H, Ruiz, G, Chavez y C, Luna. Productividad de Lechuga *Lactuca Sativa* en condiciones de Macrotúnel en suelo Vitric Haplustands. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 31(2): 93 – 105. 2016. Universidad de Nariño, Colombia.
- [17] J,Mota, J, Yuri,S, De Freitas &J, Rodríguez. Avaliação de cultivares de alface americana durante o verão em Santanada Vargem. *Horticultura Brasileira*, 21(2), 234-237. 2013.
- [18] J, Paredes, J. Evaluación de cuatro densidades de siembra en el rendimiento del cultivo de ají charapita (*Capsicum frutescens* L.) en el sector Almendras, provincia de Tocache. Universidad Nacional de San Martín Tarapoto, Facultad de Ciencias Agrarias, Tarapoto.2017. Obtenido de <http://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3367/AGRONOM%C3%8DA%20-%20Jhonathan%20Jean%20Pierre%20Paredes%20Bautista.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] E,Bijanzadeh & Y, Emam. Effect of Defoliation and Drought Stress on Yield Components and Chlorophyll Content of Wheat. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 13(14), 699-705 .2010.
- [20] M,Salehpour, A.. Ebadi, M, Izadi & S,Jamaatie. Evaluation of Water Stress and Nitrogen Fertilizer Effects on Relative Water Content, Membrane Stability Index, Chlorophyll and Some Other Traits of Lentils (*Lens culinaris* L.) Under Hydroponics Conditions. *Research Journal of Environmental Sciences*, 3(1), 103-109. 2009. Obtenido de <https://scialert.net/fulltextmobile/?doi=rjes.2009.103.109>
- [21] A,Knight. Z, Cheng. S, Grewal. K, Islam . M, Kleinhenz. & P, Grewal, P. Soil health as a predictor of lettuce productivity and quality: A case study of urban vacant lots. *Urban Ecosyst*, 16, 637-656. 2013.
- [22] B, Curtis. & M, Schnek. Movimiento de agua y minerales. Editorial Médica Panamericana.2007. Obtenido de <http://www.curtisbiologia.com/node/1739>
- [23] New South Wales. Cation exchange capacity. Gobierno de Nueva Gales del Sur, DEpartamento de Industrias Primarias, Australia.2016. Obtenido de <https://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/soils/structure/cec>
- [24] J,Yuri. R, De Souza. S, De Freitas. J, Rodríguez. & J, Mota, J.Performance of crisphead lettuce cultivars in Boa Esperança Brazil. *Horticultura Brasileira*, 20(2), 229-232. 2002.
- [25] V, Kefeli. *Natural Plant Growth inhibitors and fitohormones*. 1978.
- [26] Weather spark. El clima promedio en Cartago.2019. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/16154/Clima-promedio-en-Cartago-Costa-Rica-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- [27] E, Ávila. *Manual de lechuga*. Cámara de Comercio de Bogotá, Bogotá.2015.
- [28] Instituto Meteorológico (IMN) de Costa Rica. Estación Automática del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Instituto Meteorológico de Costa Rica. 2019. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/especial/estacion-Cartago.html>
- [29] Universidad Nacional de Colombia. COMPACTACIÓN DE SUELOS. Universidad Nacional de Colombia.2012. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/15/cap14.pdf>
- [30] G, Saavedra. *Manual de producción de lechuga*. Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile.2017. Obtenido de <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/ManualesdeProduccion/09%20Manual%20Lechuga.pdf>
- [31] E, Manrique, E. Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas*, 7(1), 1-11.2003. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/540/54012108.pdf>
- [32] A, Bakhsh. R; Kanwar. y D, Karlen. Effects of liquid swine manure applications on NO₃-N leaching losses to subsurface drainage water from loamy soils in Iowa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol 10. Pag. 118-128. 2005 <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.01.018>

- [33] F, Shaxson. & R, Barber, R. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Servicio de Manejo de las Tierras y de la Nutrición de Plantas. 2005 Obtenido de <http://www.fao.org/3/y4690s/y4690s07.htm>
- [34] C, Sierra. Factores que afectan la interpretación de los análisis de suelo. 2016. Obtenido de <http://www.elmercurio.com/campo/noticias/redes/2014/09/25/analisis-de-suelo.aspx>
- [35] J, Ibáñez. & J, Cosio. Vertisoles. 2011 Obtenido de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/10/06/140062>
- [36] R, Goldy. What is your soil cation exchange capacity? Michigan State University Extension 2011. . Obtenido de https://www.canr.msu.edu/news/what_is_your_soil_cation_exchange_capacity
- [37] S, Guy. CATION EXCHANGE CAPACITY OF SOILS. 2018 Obtenido de <https://www.smart-fertilizer.com/articles/Cation-Exchange-Capacity>
- [38] P, Hazelton. & B, Murphy. What Do All the Numbers Mean? - A Guide to the Interpretation of Soil Test Results. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma. 2007. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/316774959_Hazelton_PA_and_Murphy_BW_2007_'What_Do_All_the_Numbers_Mean_-_A_Guide_to_the_Interpretation_of_Soil_Test_Results'_CSIRO_Publishing_Melbourne
- [39] E, Molina. ANÁLISIS DE SUELOS Y SU INTERPRETACIÓN. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas. 2009.
- [40] E, Pérez, E. Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. Scielo, 14(29). 2013. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-24582013000300001
- [41] A, Moro. Relaciones catiónicas y su interpretación en los análisis de suelos. 2015. Obtenido de <http://aqmlaboratorios.com/relaciones-cationicas-analisis-de-suelos/>
- [42] INTA. LABORATORIO DE SUELOS, TEJIDO VEGETAL. 2019. Obtenido de <https://inta.gob.ar/servicios/analisis-de-suelos>
- [43] INTIA. GUIA DEL CULTIVO DE LECHUGA. Instituto Navarro de Tecnologías e Infraestructuras Agroalimentarias. 2012 Obtenido de <https://www.intiasa.es/repositorio/images/docs/GUIALECHUGA0.pdf>

Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias

Methodology for the implementation of photovoltaic systems with storage for small industries

Carlos Alberto Bolaños-Jiménez¹, Gustavo Gómez-Ramírez²

Fecha de recepción: 6 de agosto, 2021

Fecha de aprobación: 21 de marzo, 2022

Bolaños-Jiménez, C.A., Gómez-Ramírez, G. Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 18-32.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5843>

1 Estudiante de Maestría en Administración de la Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

Correo electrónico: carlosbj@selnetcr.com

 <https://orcid.org/0000-0002-4934-5101>

2 Profesor Escuela de Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggomez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-9195-072X>

Palabras clave

Energía renovable; sistema fotovoltaico; panel solar; seguidor solar.

Resumen

Hoy día los sistemas de generación renovables no convencionales a pequeña escala empiezan a tomar fuerza dentro de los sistemas eléctricos de potencia. La generación para autoconsumo puede beneficiar las pequeñas y medianas empresas a fin de volverlas más competitivas y atractivas hacia los clientes. Sistemas eólicos en pequeña escala, así como las instalaciones de sistemas solares son un ejemplo de cómo se ha masificado la tecnología, de manera que contar con un procedimiento explícito, simple y confiable para la implementación de sistemas renovables sería de gran utilidad. Este artículo presenta un procedimiento paso a paso a cerca de la implementación de sistemas fotovoltaicos en pequeñas industrias donde propone un diseño de una instalación incluyendo un análisis económico. Se toman en cuenta los sistemas de almacenamiento de energía. Los beneficios económicos y ambientales son cuantiosos, donde se demuestra una alta viabilidad de implementación de este tipo de aplicaciones en pequeñas industrias. Se logró concluir que la implementación de un sistema solar fotovoltaico en una pequeña empresa permite reducciones de costos de electricidad mayores al 90% con una pronta recuperación de la inversión.

Keywords

Renewable energy; photovoltaic system; solar panel; solar tracker.

Abstract

Today, small-scale non-conventional renewable generation systems are beginning to gain strength within electrical power systems. Generation for self-consumption can benefit small and medium-sized companies in order to make them more competitive and attractive to customers. Small-scale wind systems, as well as solar system installations, are an example of how technology has become widespread, so having an explicit, simple and reliable procedure for the implementation of renewable systems would be very useful. This article presents a step-by-step procedure about the implementation of photovoltaic systems in small industries where it proposes a design of an installation including an economic analysis. Energy storage systems are taken into account. The economic and environmental benefits are considerable, where a high viability of implementation of this type of applications in small industries is demonstrated. It was concluded that the implementation of a photovoltaic solar system in a small company allows reductions in electricity costs greater than 90% with a prompt recovery of the investment.

Introducción

En muchos países, el comportamiento de los costos de la electricidad, en los últimos años, ha estado tendiendo al alza. Esta predisposición obliga a las organizaciones a la búsqueda de nuevas fuentes de energía que posibiliten la continuidad del negocio [1]. Además, el aumento de la temperatura global, producto de los gases de efecto invernadero, está provocando efectos negativos los cuales terminan afectando el diario vivir de las personas. Estos generan largos períodos de sequía que afectan las reservas de agua, las cuales son utilizadas en muchos casos para la producción de energía eléctrica. Por lo tanto, se pronostica una tendencia al alza en los costos de la electricidad [2] en el caso de los países que exista una fuerte dependencia de la generación de electricidad por fuente hidráulicas.

Una alternativa es la utilización de fuentes de energía no convencionales como las fuentes eólicas y fotovoltaicas, a fin de aumentar la variabilidad en la utilización de fuentes de generación. Los sistemas eólicos están compuestos de una turbina que aprovecha la energía del viento para generar electricidad por medio de un generador acoplado al sistema de potencia. Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos están compuestos principalmente por: paneles solares, regulador, inversor, acumulador, centro de carga y medidor bidireccional. Su funcionamiento es posible gracias a los paneles solares, donde gracias al efecto fotoeléctrico, la energía solar se transforma en energía eléctrica de corriente continua, y luego convertida en corriente alterna para un uso regular [3]. Los sistemas fotovoltaicos posibilitan el aprovechamiento de la energía solar, una fuente renovable e inagotable, logrando ahorrar en la factura eléctrica desde un 80% en adelante según el consumo mensual [4], [5].

Uno de los tipos de sistema son los llamados conectados a la red (On-Grid), los cuales tienen la particularidad que se unen en un punto a la red eléctrica pública del proveedor de servicio. Esto con el fin de reinyectar a la red el excedente de energía generado, para posteriormente ser utilizado cuando no haya generación solar [6].

Para el año 2013, los análisis de factibilidad para el uso de paneles solares en generación fotovoltaica de electricidad no lograban obtener tasas de retorno atractivas debido a los altos costos de los equipos [7], [8]. Sin embargo, para el año 2014 la tecnología de celdas solares muestra signos de progresos en aspectos como la eficiencia, estabilidad y la comercialización [9]. Durante el 2016, organizaciones de renombre aseguran que la industria solar fotovoltaica es la energía renovable con más generación de empleos, y que además es uno de los factores que más colaborarán ante la problemática del cambio climático. También, reafirman que, en los años venideros, gracias a los avances en la investigación de la tecnología, se espera que el costo de los paneles solares disminuiría hasta en un 59% [10].

Incluso en el 2017, existen estudios de factibilidad para proyectos de autogeneración fotovoltaica con rentabilidades no atractivas para los inversionistas [11]. En los años posteriores, el desarrollo de la tecnología, cómo es el caso del posicionamiento de las células solares en cascada, celdas bifaciales, paneles nocturnos, están contribuyendo en aumentar la eficiencia y reducción de los costos [12], [13], [14]. Tal es el caso durante el 2020, donde un equipo científico logra un récord mundial de conversión de energía solar a electricidad mediante el uso de nano partículas en la que se tienen resultados con eficiencias cercanas al 25% a bajo costo [15], [16], [17].

Ante este panorama es importante tener criterios para la utilización de estos sistemas ya que hoy día es posible combinarlos con sistemas de almacenamiento [18] y, de esta manera, maximizar su uso y aplicabilidad, por lo tanto, el uso de los sistemas fotovoltaicos podrá reducir los costos en la electricidad y de esta forma, lograr hacer un manejo eficiente de la energía eléctrica [19]. Es importante mencionar que la tendencia a futuro será hacer más distribuida la generación de electricidad y por lo tanto menos concentrada, a diferencia de los esquemas tradicionales de generación [20].

Primeramente, se expone el procedimiento a seguir para el análisis de un sistema fotovoltaico [21], [22]. Seguidamente se presenta un caso de estudio de una pequeña industria ubicada en Costa Rica al cuál se le aplica la metodología propuesta. El potencial solar teórico del país es de 10000 MWh, de los cuáles al 2018 el país contaba con 27 MWh instalados. Representando esto un 0.27% de aprovechamiento total, se detecta el gran potencial proveniente de la energía solar disponible en la zona [2], [23]. La región de Centroamérica y en particular Costa Rica presentan grandes condiciones para la utilización de sistema fotovoltaicos [18] de pequeña, mediana y gran escala.

Se trata de una pequeña industria con un consumo promedio de 5135 kWh mensuales. La aplicación de la metodología arroja un requerimiento fotovoltaico de 42.12 kW pico a instalar, para un costo total del proyecto de USD \$39,747.00.

Finalmente, se logra comprobar la factibilidad técnica y financiera para el caso de estudio, mediante un ahorro en la factura eléctrica mensual de un 90% con periodos de recuperación entre 5 y 9 años, con una reducción de la huella de carbono en 3.43 toneladas de CO_2 equivalentes anuales.

Metodología

En la presente sección se muestra el desarrollo de la metodología para análisis de cargas, diseño, selección de equipos, posterior cálculo de rendimiento energético y análisis económico de un sistema fotovoltaico para una pequeña empresa [24]. El paso a paso se muestra en la figura 1 y se explica a continuación [25]:

Levantamiento de cargas eléctricas

Primeramente, se procede a recolectar los datos de consumo eléctrico mensual. Un periodo de al menos 12 a 18 meses es suficiente para obtener resultados certeros con la información proporcionada por la compañía eléctrica [26]. Sin embargo, si se tiene una medición constante y por lo tanto un historial de consumos, se puede recurrir a la minería de datos para definir perfiles de las cargas instaladas.

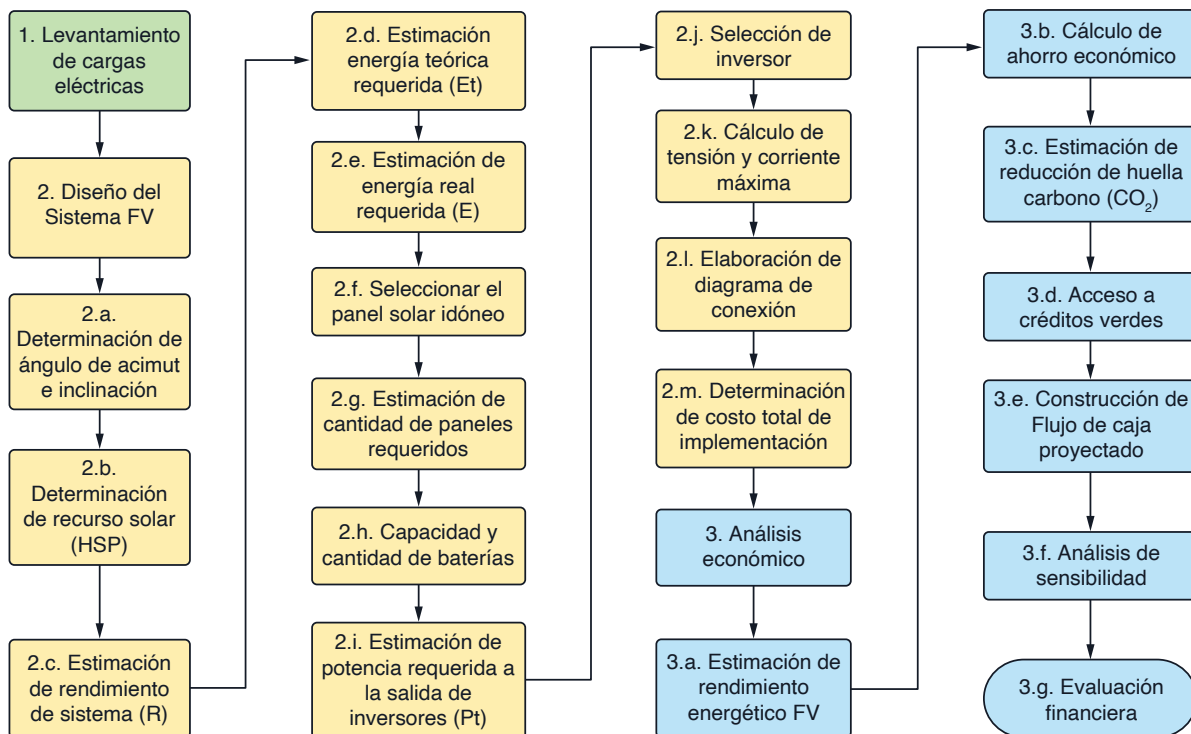


Figura 1. Esquema de metodología en la implementación de sistema fotovoltaico.

Aspectos operativos iniciales se deben de tomar en cuenta pues la identificación las coordenadas geográficas del sitio en cuestión son muy importantes de establecer para determinar el potencial de generación del sistema fotovoltaico. Del mismo modo, las condiciones del lugar a instalar los paneles deben ser tomados en cuenta.

Diseño del sistema fotovoltaico

Ángulo de acimut e inclinación

Dependiendo de la ubicación geográfica de la instalación se debe calcular el ángulo acimut óptimo. En el caso del ángulo de inclinación, se propone el siguiente el procedimiento mostrado en la figura 2 para determinar su valor óptimo.

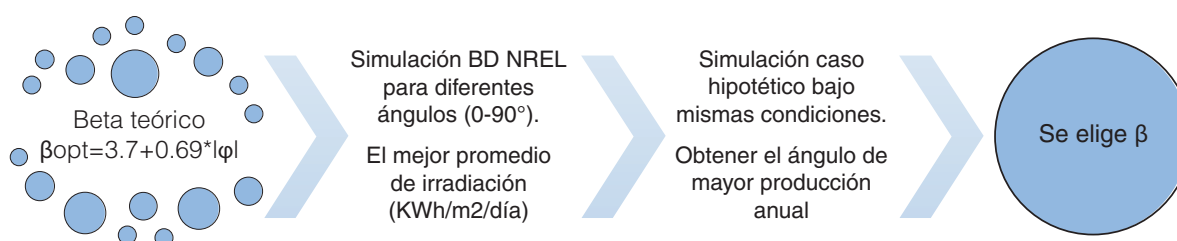


Figura 2. Procedimiento para determinación del ángulo de inclinación óptimo beta (β).

Recurso solar

La determinación del recurso solar específico para el sitio elegido se definió mediante la investigación de bases de datos de NREL (siglas en inglés de N...) y la NASA (siglas en inglés de...) [27], [28]. El valor elegido de irradiación solar fue el promedio de ambas fuentes y se denota con las siglas G_{dm} . Se calcula mediante la ecuación 1, siendo G_{dm} la irradiación global diaria promedio.

$$HSP = \frac{G_{dm} \left[\frac{Wh}{m^2/día} \right]}{1000 [W/m^2]} \quad (1)$$

Estimación del rendimiento del sistema

Se utilizó como referencia el método recomendado por Vega et al. [25]. El primer paso fue obtener el rendimiento del sistema (R), mediante la ecuación 2.

$$R = (1 - k_b - k_c - k_v) * \left(1 - \frac{K_a * N}{P_d} \right) \quad (2)$$

Donde:

- k_b : coeficiente de pérdidas debidas al rendimiento del acumulador. Se elige 0 porque el sistema no posee acumulador de energía. Un valor de 0.05 en sistemas que no producen descargas profundas y uno de 0.1 en caso de que los sistemas se diseñen con descargas profundas.

- k_c : coeficiente de pérdidas del inversor. Se elige 0,05 por cuanto se trata de un inversor de onda sinusoidal pura con 96% de eficiencia. Un valor de 0.05 para inversor de salida sinusoidal pura en condiciones óptimas de operación y otro de 0.1 para condiciones de trabajo alejadas.
- k_v : coeficiente de pérdidas varias. Se elige 0.1 contemplando pérdidas atmosféricas, de cableado, sombreado, suciedad, tolerancia de paneles, temperatura por lo que este valor debe estar en el siguiente rango: $0.05 < k_v < 0.15$
- K_a : coeficiente de auto descarga diaria de las baterías. Se elige 0, porque el sistema no posee acumulador de energía. Un valor de 0.002 para una batería de baja auto descarga (Ni-Cd), un valor de 0.005 para baterías de plomo-ácido y uno de 0.13 para batería de alta auto descarga (SLI).
- N : días de autonomía de la instalación. Se elige 0 días de autonomía, porque el sistema no requiere operar con energía almacenada.
- P_d : profundidad de descarga $\leq 100\%$. Se elige 100% puesto que el sistema no tiene pérdidas por almacenamiento de energía.

Estimación energía teórica requerida ()

A partir del consumo de energía eléctrico promedio mensual, se obtiene la energía teórica requerida, dividiendo entre 30 días, E_T [kWh].

Estimación de energía real requerida (T)

mediante la ecuación 3 se calcula la energía requerida real diaria ().

$$E = \frac{E_T[\text{kWh/día}]}{R} \quad (3)$$

Selección el panel solar idóneo

Seguidamente, se debe seleccionar el panel solar que mejor se adecue a las condiciones técnicas y financieras. Se realiza un análisis de algunos paneles solares disponibles en la actualidad, de manera que se elige el que tenga la mejor relación costo/calidad.

Estimación de cantidad de paneles requeridos

Luego, se procede a estimar la cantidad de paneles solares necesarios (N_p). Siendo W_p la potencia del panel elegido, HPS la hora solar pico.

$$N_p = \frac{E}{0.9 * W_p * HPS} \quad (4)$$

Se aumenta la cantidad de paneles al inmediato número par superior, para una correcta distribución en cada inversor. Con la cantidad de paneles calculada, se determina el área efectiva requerida en techos, mediante la multiplicación del área del panel elegido por la cantidad de paneles requeridos.

Capacidad y requerimiento de almacenamiento

Se debe elegir la tensión del sistema entre 12VDC, 24VDC o 48VDC, según los siguientes criterios:

- De 1 a 2000 Wh de consumo diario, se recomienda hacer el sistema a 12VDC.
- De 2001 a 4000 Wh de consumo diario, se recomienda hacer el sistema a 24VDC.
- De 4001 Wh en adelante, se recomienda hacer el sistema a 48VDC.

El parámetro de la batería Ah/día se calcula de la siguiente manera:

$$C = \frac{E[\text{kWh/día}] * N[\text{días}]}{V_b[\text{V}] * P_d[\%]} \text{ [Ah]} \quad (5)$$

Donde,

E : energía real requerida.

N : número de días de autonomía.

V_b : tensión del banco de baterías.

P_d : profundidad de descarga.

Seguidamente se calcula la cantidad de unidades requeridas:

$$N_o \text{ Baterías} = \frac{C[\text{Ah}]}{C_{\text{batería}}[\text{Ah}]} \quad (6)$$

De acuerdo con [29], la tecnología de almacenamiento de ion de litio representa en la actualidad, la opción de mayor atractivo financiero.

Estimación de potencia requerida a la salida de inversores (P_I)

Mediante la ecuación 7 se calcula la potencia total requerida a la salida de los inversores (P_I).

$$P_I = \frac{E_T[\text{kWh/día}]}{HSP [\text{h/día}]} \text{ [kW]} \quad (7)$$

Selección de inversor

Con el dato anterior y las condiciones eléctricas necesarias, se elige un inversor disponible en el mercado actual con la mejor relación costo/eficiencia.

Cálculo de tensión y corriente máxima

La tensión máxima de un sistema fotovoltaico en la salida de corriente directa se calculó mediante la suma de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) de los módulos fotovoltaicos conectados en serie, multiplicada por un factor de corrección según la temperatura ambiente más baja esperada. Este valor se calculó con el objetivo de determinar la tensión nominal de los cables, desconectores, dispositivos de protección contra sobre corriente y otros equipos, así como los factores de corrección por temperatura en conductores entre otros [30].

Con respecto a la corriente máxima, se tiene que su valor máximo se calcula mediante la suma de las corrientes nominales de cortocircuito (I_{sc}) de los módulos fotovoltaicos conectados en paralelo, y multiplicado por el 125%. Para el caso del valor nominal (I_{nom}) de los dispositivos contra sobre-corrientes, se calculará mediante la multiplicación de la corriente máxima por el 125%. Seguidamente, se calcula mediante la ecuación 8 y 9 la cantidad mínima y máxima de paneles a conectar, para que el inversor opere de manera óptima. Donde V_{mp} es la tensión a máxima potencia del panel.

$$\text{máxima cantidad de Paneles}_{serie} = \frac{\text{Rango de tensión superior [V]}}{V_{mp}[V]} \quad (8)$$

$$\text{mínima cantidad de Paneles}_{serie} = \frac{\text{Rango de tensión inferior [V]}}{V_{mp}[V]} \quad (9)$$

La tensión máxima se calcula mediante la ecuación 10 y 11.

$$V_{max} = V_{OC \text{ arreglo}} * \text{factor de corrección} \quad (10)$$

$$V_{OC \text{ arreglo}} = V_{OC \text{ Panel}} * \text{cantidad de Paneles}_{serie} \quad (11)$$

Para la corriente máxima se utiliza la ecuación 12.

$$I_{max} = I_{sc}(A) * 1.25 \quad (12)$$

Además, mediante la ecuación 13 se calcula la corriente nominal para la determinación de las protecciones por sobre corriente,

$$I_{nom} = I_{max}(A) * 1.25 \quad (13)$$

Elaboración de diagrama de conexión

En este punto, ya se conocen todos los elementos que conforman el sistema, por lo tanto, se procede a diagramar el conexionado del mismo.

Determinación de costo total de implementación

Además, se define el costo de la implementación de este con referencias del mercado local. Se recomienda esto último para subsanar el tema de garantías.

Análisis económico

Rendimiento energético estimado

Posterior al diseño del sistema, se procede, mediante una simulación, a la estimación de la producción de energía eléctrica del sistema fotovoltaico.

Análisis de ahorro

Para tasar el ahorro anual al implementar el proyecto, se simula la puesta en marcha de la solución y se compara mediante una tabla, los costos anuales actuales vs los costos con el sistema FV.

Estimación de reducción de huella carbono

Se calcula el CO_2 equivalente evitado en toneladas al año. Este último se calcula mediante la ecuación 12. Donde el factor se obtiene de [31].

$$CO_2 [Ton] = \frac{\text{Consumo anual eléctrico evitado [kWh]} * \text{Factor de emisión (Kg de } CO_2 \text{ eq/kWh)}}{1000} \quad (12)$$

Acceso a Financiamiento mediante créditos verdes

Mediante la magnitud calculada anterior, se realiza una revisión de los tipos de créditos disponibles según el área de ejecución. Donde se elige aquella que represente mayor atractivo económico.

Construcción de Flujo de caja proyectado

En este punto ya se cuenta con información suficiente para proyectar un flujo de caja financiero del proyecto. Se elige un plazo de años según sea la menor garantía de los elementos que conforman el sistema.

Análisis de sensibilidad

Opcionalmente se recomienda elaborar un estudio de sensibilidad el cual permita visualizar el comportamiento del sistema en casos hipotéticos que sean de interés para el lugar del emplazamiento.

Evaluación financiera

Finalmente, se eligen y calculan los criterios económicos determinantes para la toma de decisiones, según criterios establecidos por la organización.

Caso de estudio

La aplicación de la metodología propuesta se aplica en una pequeña industria ubicada en Costa Rica.

La empresa cuenta con un área de 500 metros cuadrados de construcción, y una tensión monofásica de alimentación en 120/240 VAC. Asimismo, con un área de 370 m² de área efectiva disponible para la instalación de paneles solares. El sistema fotovoltaico estimado requerirá 200 mts (102 paneles) de área efectiva, para un potencial total de 42.12 kW, mediante paneles fotovoltaicos de 405W cada uno. Se seleccionaron 4 inversores de 8200 W de potencia cada uno.

Según [32] los costos de las baterías de iones de litio estará por debajo de \$100/kWh para 2024. Este índice arroja a su vez costos para sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de \$2/W, los cuales, mediante cálculos rápidos proyectan índices económicos no convenientes (TIR 1%) con períodos de recuperación de inversión mayores a los 11 años. Por lo tanto, la solución del sistema no incluye el elemento acumulador debido a que por temas de costo representaría una solución inviable económicamente. Sin embargo, la tendencia es que conforme pasen los años

los sistemas con almacenamiento empiecen a ser rentables. De igual manera, se menciona la cantidad y el tipo de batería a valorar para un futuro próximo. A continuación, se explica el paso a paso de la aplicación de la metodología para ser aplicada en una pequeña industria:

Paso 1. Levantamiento de cargas eléctricas

En la figura 3 se muestra el comportamiento de consumo eléctrico de la planta, basado en un historial de los últimos 12 meses en el momento de la aplicación de la metodología, de los cuales se tiene un valor promedio de 5135 kWh mensuales.

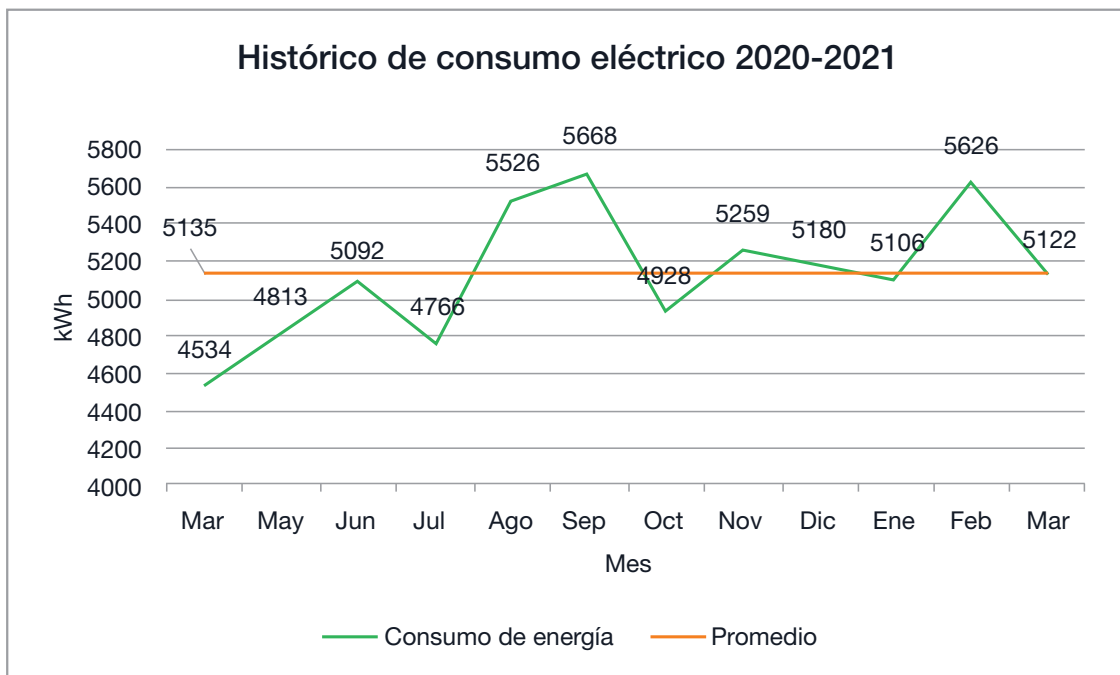


Figura 3. Comportamiento de consumo de energía eléctrica mensual para la empresa bajo estudio basado en [10].

Respecto a la demanda máxima de potencia, se obtuvo un valor promedio de 14.5 kW, suministrado por un histórico de consumo de parte del proveedor de servicio [33].

Paso 2. Diseño de sistema fotovoltaico

Las figuras 4 muestra el potencial solar real según [27], [28].

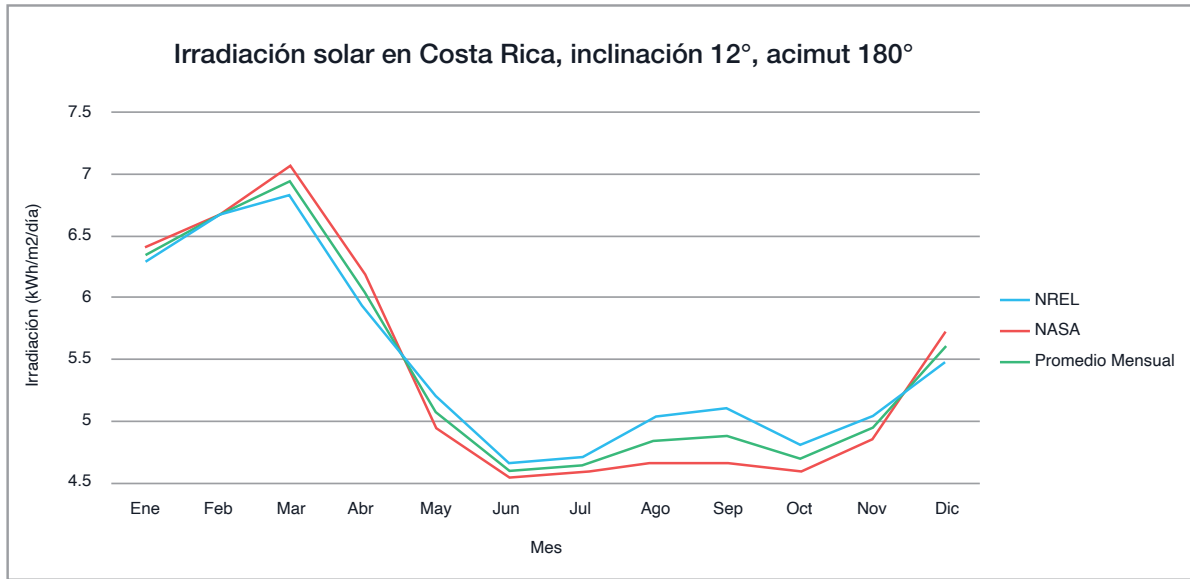


Figura 4. Irradiación solar en Costa Rica para una inclinación 12°y un ángulo acimut 180° basado en [27], [28].

En el cuadro 1 se muestra el resultado de acuerdo con el paso a paso del diseño del sistema fotovoltaico, mientras la figura 5 se observa el diagrama esquemático del diseño propuesto de acuerdo con el paso a de la metodología.

Cuadro 1. Resultado de diseño para sistema fotovoltaico caso de estudio.

Paso 2. Diseño de sistema fotovoltaico			
Paso	Parámetro	Valor	Descripción
a	Ángulo acimut (°)	180.0	Sur
a	Ángulo inclinación (°)	12.0	De los paneles
b	Hora solar pico (horas)	5.4	HSP al día
c	Rendimiento (R[%])	85.0	Pérdidas
d	Energía teórica requerida (Et [kWh])	171.2	Requerimiento teórico
e	Energía real requerida (E [kWh/día])	201.4	Requerimiento real
f	Panel solar elegido (W)	405.0	Eficiencia 21.1%
g	Cantidad de paneles	102.0	42.12 kW pico
h	Capacidad de baterías (Ah)	3876.6	Para implementación futura
h	Cantidad de baterías	20.0	De 10 kWh cada una
i	Potencia requerida (Pt[kW])	31.4	En la salida de los inversores
j	Potencia inversores (kW)	32.8	4 inversores de 8 kW
k	Tensión máxima (V)	560	Máxima tensión de soporte
k	Corriente máxima (A)	20	Interruptor termomagnético
m	Costo Total (USD)	39747	Costo Final

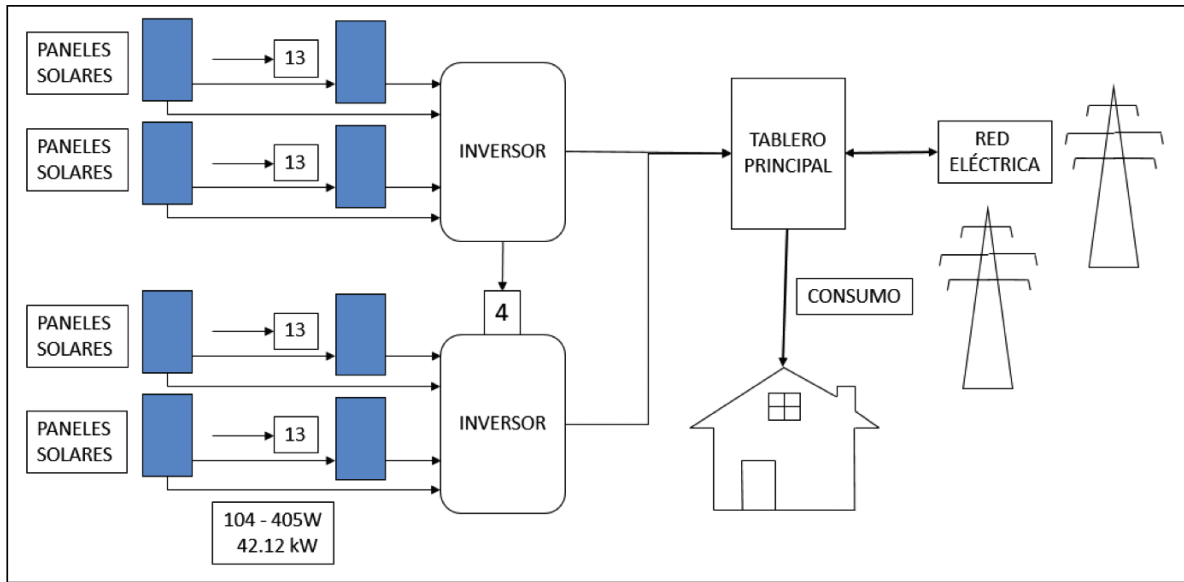


Figura 5. Esquema de solución para el sistema solar fotovoltaico On-Grid.

Paso 3. Análisis económico

En la figura 6 se muestra la producción energética esperada vs el consumo actual. Se observa un mínimo de generación en junio de 4342 kWh y un máximo de 6771 kWh en marzo. Representaría un ahorro anual de CO₂ equivalente de 3.43 toneladas.

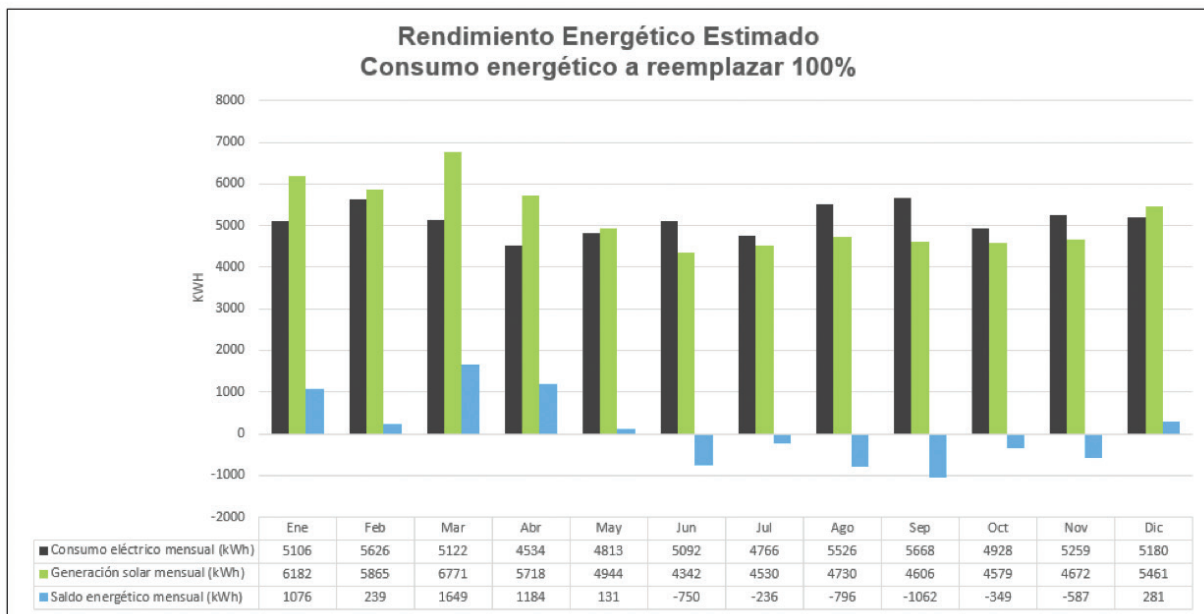


Figura 6. Paso a. Rendimiento energético esperado del sistema On-Grid vs consumo actual.

Se procedió a simular la implementación del sistema propuesto mediante el programa de generación distribuida para autoconsumo con medición neta sencilla disponible en el país, con el objeto de estimar el ahorro anual tal y como se muestra en el cuadro 2. La implementación del proyecto sin financiamiento lograría un ahorro mensual en la factura eléctrica de 825 USD con una recuperación de la inversión en 9 años. En el caso de recurrir a financiamiento, se obtendrían ahorros mensuales de 428 USD con una recuperación de la inversión en 5 años. Se espera que la vida útil del proyecto sea de 25 años.

Cuadro 2. Paso b y c. Ahorro anual mediante la implementación del sistema fotovoltaico On-Grid.

Facturación con sistema fotovoltaico		Antes	Después
Demanda de factura anual		14.5 kW	0 kW
Consumo de energía anual		61620 kWh	61620 kWh
Generación anual de energía	101%	0 kWh	62401 kWh
Inyectado (<49%)		0%	7.3%
Inyectado (kWh)		0 kWh	4561 kWh
Consumo anual de energía descubierto		61620 kWh	0 kWh
Cargo anual por energía <3000 kWh	\$0.172	\$0	\$0
Cargo anual por energía >3000 kWh	\$0.1029	\$6,342	\$0
Cargo anual por demanda	\$17	\$2,970	\$0
Cargo por tarifa de acceso	\$0.0418	\$0	\$191
TOTAL		\$10,957	\$231
Ahorro anual		98%	\$ 10,726
Ahorro ambiental		3.43 Ton de CO ₂ eq.	

Discusión

Mediante el procedimiento para la implementación de sistemas fotovoltaicos se logró analizar un caso de estudio de una pequeña industria ubicada en Costa Rica. La investigación permitió establecer los parámetros iniciales para el diseño del sistema fotovoltaico y de esta manera hacer un uso racional de la energía eléctrica. También permitió estimar los ángulos de acimut y de inclinación de manera óptima para el sitio bajo estudio. El dimensionamiento elaborado demostró la viabilidad técnica del sistema de energía renovable propuesto. Además, el procedimiento logró estimar ahorros en los costos de electricidad entre 428 y 825 USD y periodos de recuperación entre 5 y 9 años respectivamente. Asimismo, su implementación significaría la reducción de la huella de carbono en 3.43 toneladas de CO₂ equivalentes anuales; lo que facilitaría el acceso a créditos verdes. Estos representan opciones crediticias más rentables.

Conclusiones

La metodología presentada permitió calcular efectivamente el dimensionamiento de una planta fotovoltaica. Los resultados permitieron estimar la cantidad de paneles solares necesarios, inversores, tensiones e intensidades máximas permitidas, como también el rendimiento del sistema y el análisis económico. Además, permitió visualizar el valor posible de reducción en la huella de carbono asociada. Mediante la implementación de la metodología en un caso de estudio se comprobó la factibilidad técnica y financiera para la implementación de sistemas fotovoltaicos con inyección a la red sin la utilización del almacenamiento de energía. Esto fue

importante pues a través de la metodología se lograron tomar decisiones basadas en criterios técnicos y económicos no incurriendo en gastos innecesarios, ya que considerar el uso del almacenamiento en este momento no traería beneficios a la industria analizada debido a los consumos presentados, no obstante, en otras aplicaciones puede ser completamente viable y positivo. Los costos del almacenamiento en este caso son altos a pesar de que esta tecnología hoy día es más económica que antes. Los sistemas fotovoltaicos son una buena herramienta para reducir los costos eléctricos para pequeñas industrias en valores superiores al 90% como en este caso. De manera paralela, contribuyen a la reducción de la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera y con ello combatir de manera sistemática la problemática del cambio climático. Un proyecto de este tipo contribuye a fomentar el autoconsumo para maximizar los recursos disponibles como el sol y de esta manera minimizar el impacto que otras tecnologías han ocasionado al ambiente.

Agradecimientos

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

Referencias

- [1] Autosolar Energy Solutions SLU, «Paneles solares nocturnos ¿es posible?», 10 02 2020. [En línea]. Available: <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/paneles-solares-nocturnos-es-posible>. [Último acceso: 18 Marzo 2021].
- [2] T. d. J. Guzmán Hernández, F. Araya Rodríguez, J. M. Obando Ulloa, M. Rivero Marcos, G. Castro Badilla, G. Quiroz Vinda, D. A. Rodríguez Rojas, N. Arce Hernández, J. M. Ortega Castillo, S. Oviedo Ortega, G. García Castro, C. Moreira Segura, V. Arguelles Ulloa, J. Ortiz Martínez y M. Fernández Rodríguez, «Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica (Parte I y II)», 2021. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/2238/12473>. [Último acceso: 26 Marzo 2021].
- [3] SDE México, «¿Qué Es Un Sistema Fotovoltaico?», s.f.. [En línea]. Available: <http://www.sde.mx/que-es-un-sistema-fotovoltaico/>. [Último acceso: 13 Mayo 2021].
- [4] F. Katiraei y J. R. Agüero, «Solar PV Integration Challenges,» *Power and Energy Magazine*, vol. 9, n° 3, pp. 62-71, May-June 2011, doi: 10.1109/MPE.2011.940579.
- [5] D. A. Contreras Cerón, N. Aguirre Carranza y C. A. Cajamarca Montes, «Repositorio Institucional-Análisis de un Sistema Fotovoltaico para el Ahorro de Energía para una Empresa Procesadora de Alimentos en el Barrio Las Ferias en Bogotá,» UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS., 2017. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/11349/6094>. [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [6] S. Santiago, «Energías renovables: ¿Qué es un sistema solar fotovoltaico?», Junio 2020. [En línea]. Available: <https://redkopora.com/energia-renovable/que-es-un-panel-solar-fotovoltaico/>. [Último acceso: 23 Febrero 2021].
- [7] R. Best y S. Trück, «Capital and policy impacts on Australian small-scale solar installations,» *Energy Policy*, n° 111082, p. 136, 2020.
- [8] Cambio Energético, «¿CUÁL ES LA ÚLTIMA TECNOLOGÍA EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS?», 24 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.cambioenergetico.com/blog/ultima-tecnologia-placas-solares/>. [Último acceso: 29 Junio 2021].
- [9] E. Rocha, P. Carbo, J. Rodríguez, E. Martínez y E. Armendáriz, «Avances recientes y monitoreo de celdas solares fotoelectroquímicas,» Universidad Politécnica de Victoria, Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Guanajuato: Ramos y Aguilera, Guanajuato, 2014.
- [10] D. Gielen, R. Kempener, M. Taylor, F. Boshell y A. Seleem, «Letting in the light: how solar photovoltaics will revolutionise the electricity system,» *IRENA: Abu Dhabi, UAE*, 2016.
- [11] L. H. Higuera Aguilar y H. Carmona Valencia, «Análisis de factibilidad de un proyecto de autogeneración eléctrica fotovoltaica en Colombia para áreas productivas menores de 10.000 m²,» 2017. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10784/11690>. [Último acceso: 24 Mayo 2021].

- [12] The World Bank, «Solar resource maps of Costa Rica,» 2020. [En línea]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/costa-rica>. [Último acceso: 22 Abril 2021].
- [13] International Renewable Energy Agency, «Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects,» *A Global Energy Transformation*, 2019.
- [14] R. Best, P. J. Burke y S. Nishitaten, «Evaluating the effectiveness of Australia's Small-scale Renewable Energy Scheme for rooftop solar,» *Energy Economics*, n° 104475, p. 84, 2019.
- [15] M. A. Chávez Guerrero, «Proyecto de Factibilidad para uso de Paneles Solares en Generación Fotovoltaica de Electricidad en el Complejo Habitacional "San Antonio" de Riobamba.,» 08 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/2478>. [Último acceso: 16 Abril 2021].
- [16] E. O'Shaughnessy, G. F. Nemet, J. Pless y R. Margolis, «Addressing the soft cost challenge in US small-scale solar PV system pricing,» *Energy Policy*, n° 110956, p. 134, 2019.
- [17] G. L. Barbose, N. R. Darghouth, K. M. D. LaCommare y J. Rand, «Tracking the sun: Installed price trends for distributed photovoltaic systems in the United States-2018 edition,» *Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States)*, 2018.
- [18] G. A. Gómez Ramírez, C. Meza y S. Morales Hernández, «Oportunidades y desafíos para la integración de almacenamiento electroquímico en las redes eléctricas centroamericanas,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 34, n° 3, pp. 70-82, 2021.
- [19] B. Bollinger y K. Gillingham, «Learning-by-doing in solar photovoltaic installations,» *Available at SSRN 2342406*, 2019.
- [20] N. N. Opiyo, «Impacts of neighbourhood influence on social acceptance of small solar home systems in rural western Kenya,» *Energy Research & Social Science*, vol. 52, pp. 91-98, 2019.
- [21] C. Ho, H. W. Lee y J. A. Gambatese, «Application of Prevention through Design (PtD) to improve the safety of solar installations on small buildings,» *Safety science*, n° 104633, p. 125, 2020.
- [22] T. M. John y S. T. Wara, «A Tutorial on the Development of a Smart Calculator to Determine the Installed Solar Requirements for Households and Small Businesses,» *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 319-323, 2018, doi: 10.1109/PowerAfrica.2018.8521000.
- [23] J. F. Lara, «Costa Rica desaprovecha potencial para generación de energía solar,» *La Nación*, 05 Abril 2018.
- [24] LA PRESIDENTA DE LA REPÚBLICA Y LA MINISTRA DE ECONOMÍA, INDUSTRIA Y COMERCIO, «Procuraduría General de la República de Costa Rica,» 22 Junio 2015. [En línea]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=72517&nValor3=102335&strTipM=TC. [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [25] K. Vega Carranza, J. F. Piedra Segura y G. Richmond Navarro, «Dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos mediante una interfaz gráfica,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 32, n° 3, pp. 66-78, 2019.
- [26] INTECO, *INTE/ISO 50002:2018-Auditorías energéticas — Requisitos con orientación para su uso*, ©INTECO, 2018.
- [27] NASA, «The Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER),» 2021. [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Último acceso: 19 Mayo 2021].
- [28] NREL, «NREL's PVWatts® Calculator,» 2021. [En línea]. Available: <https://pvwatts.nrel.gov/>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [29] Energías Renovables, «Nuevo avance para convertir la energía solar en electricidad mediante puntos cuánticos,» 02 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/nuevo-avance-para-convertir-la-energia-solar-20200302>. [Último acceso: 08 Enero 2021].
- [30] NFPA, «Código Eléctrico Nacional,» 2014. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/42674546/C%C3%B3digo_El%C3%A9ctrico_Nacional_2014_NFPA_70_Espa%C3%B1ol. [Último acceso: 26 Junio 2021].
- [31] S. A. Guadamuz Arias, «Inventario de gases efecto invernadero de diez instalaciones de una institución pública costarricense,» 2018. [En línea]. Available: <https://hdl.handle.net/2238/10089>. [Último acceso: 20 Mayo 2021].
- [32] J. Moore, «Bloomberg Finance L.P.,» 22 Abril 2020. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://data.bloomberglp.com/promo/sites/12/678001-BNEF_2020-04-22-Executive-Factbook.pdf?link=cta-text. [Último acceso: 27 Abril 2022].
- [33] INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD, «Tarifas actuales - ICE,» 30 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/669c79e9-84c9-4682-b63b-136238ebc7e2/Tarifas+actuales.pdf?MOD=AJPERES>. [Último acceso: 17 Julio 2021].

Primer informe sobre heteroblastia en protofilas de tacaco (*Sechium tacaco*)

First report on heteroblasty in tacaco (*Sechium tacaco*) protophylls



José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 2 de noviembre, 2021

Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2022

Monge-Pérez, J.E., Loría-Coto, M. Primer informe sobre heteroblastia en protofilas de tacaco (*Sechium Tacaco*). *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 33-41.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5891>

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

Palabras clave

Botánica; *cucurbitaceae*; hoja; morfología; tallo.

Resumen

El objetivo del trabajo fue realizar observaciones en las protofilas de plántulas de tacaco. Se sembraron 50 semillas de tacaco, y se evaluaron las protofilas de las plántulas emergidas, hasta los 91 días después de siembra. Se encontraron protofilas con uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis y siete lóbulos cada una. En la presente investigación se informa por primera vez sobre la existencia de heteroblastia (diferente número de lóbulos) en las protofilas de tacaco, lo que representa un hallazgo que puede ilustrar los cambios evolutivos recientes de esta especie.

Keywords

Botany; *cucurbitaceae*; leaf; morphology; stem.

Abstract

The objective of the study was to make observations on the protophylls of tacaco seedlings. 50 tacaco seeds were sown, and the protophylls of the emerged seedlings were evaluated, up to 91 days after sowing. Protophylls with one, two, three, four, five, six and seven lobes each were found. This is the first notice about the existence of heteroblasty (different number of lobes) in tacaco protophylls; this could illustrate the recent evolutive changes of this species.

Introducción

El tacaco, [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey], es una especie vegetal de la familia Cucurbitaceae que presenta una planta herbácea, trepadora, anual y monoica; sus frutos se consumen como alimento [1]. Es una especie endémica de Costa Rica [2] [3], y se ha sugerido que debe ser considerada como patrimonio natural de este país [1].

El cultivo del tacaco se practica preferentemente en zonas con altitudes entre 500 y 1800 msnm, y se puede realizar prácticamente en cualquier época del año [1] [4] [5]. Recientemente se estimó la distribución potencial de esta especie en Costa Rica [6].

Las hojas correspondientes al estado juvenil de la planta reciben el nombre de protofilas, con el fin de distinguir las de aquellas típicas de la planta adulta, que son las metafilas, nomofilas o trofofilas; las protofilas son usualmente de morfología más simple que las metafilas [7].

En una especie vegetal, cuando la forma de la hoja cambia en una misma planta durante su ontogenia, se dice que la planta tiene desarrollo heteroblástico [7].

Muchas plantas exhiben un fenómeno llamado heterofilia, en que las hojas de un vástago muestran variedad de formas alternativas; se reconocen dos tipos de heterofilia: el desarrollo heteroblástico que involucra una transición gradual o abrupta de formas de crecimiento juveniles o adultas, y la heterofilia que se origina en la habilidad con que las hojas en desarrollo de ciertas plantas responden a las condiciones ambientales prevalecientes [7].

En 1994 se realizó una descripción morfológica de los órganos vegetativos y reproductivos de *Sechium tacaco*, y se determinó que esta especie presenta una clara heterofilia, pues las protofilas presentan cinco lóbulos y son muy divididas, mientras que las metafilas presentan tres

lóbulos y son más enteras [8]. Además, otro autor indicó que los lóbulos de las protofilas son angostos [2]. Sin embargo, en esas investigaciones no se informó nada sobre la presencia de protofilas con un número de lóbulos diferente de cinco en esta especie.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en Ochomogo de Cartago (9° 54' 20,073" latitud Norte y 83° 56' 2,418" longitud Oeste), a una altitud de 1716 msnm, entre abril y julio de 2021. Se sembraron 50 semillas de tacaco procedentes de la zona de Cartago, en macetas rellenas con sustrato de tierra mezclada con fibra de coco, en una proporción 50:50. Luego de 40 días, varias de las semillas germinaron y produjeron plántulas. Se realizaron observaciones sobre las protofilas de las cinco plántulas emergidas, hasta los 91 días después de la siembra.

Resultados y discusión

En las plántulas evaluadas, se encontraron protofilas con uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis y siete lóbulos cada una (figuras 1 a 10). Durante el proceso de crecimiento y desarrollo de cada plántula, se encontraron protofilas con diferente número de lóbulos, hasta que dicho número se estandarizó en siete lóbulos en las plántulas evaluadas (cuadro 1). En las cinco plántulas, la primera protofila mostró un solo lóbulo; además, en cuatro de las cinco plántulas se encontró más de una protofila con un solo lóbulo (por ejemplo, figura 8). El número de lóbulos de las protofilas fue aumentando conforme la plántula crece, hasta alcanzar los siete lóbulos. El número de protofilas que tuvo menos de siete lóbulos estuvo entre cuatro y siete en cada plántula, y luego de esto las siguientes protofilas mostraron siempre siete lóbulos. Por lo tanto, en este caso la heteroblastia se considera como un proceso de transición durante la etapa de desarrollo de la plántula, y no como respuesta a las condiciones ambientales.



Figura 1. Protofila de tacaco con un lóbulo.

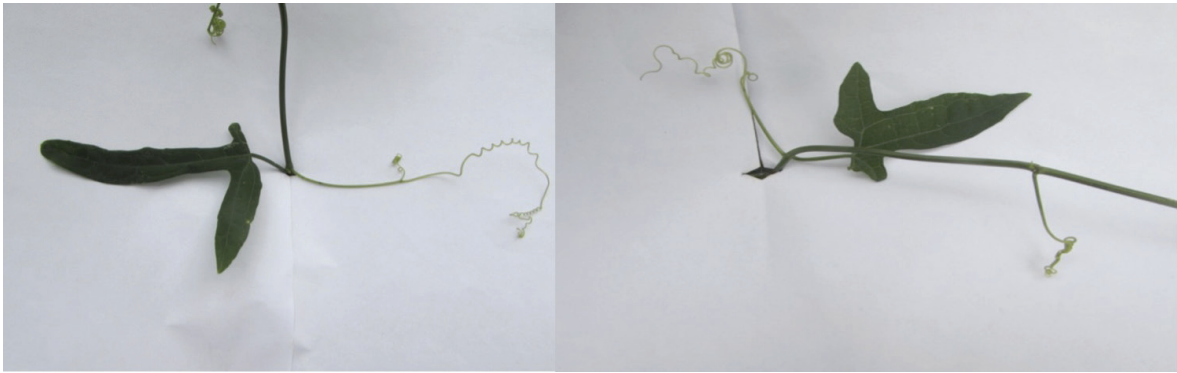


Figura 2. Protofilas de tacaco, con dos lóbulos completos (normales) más un lóbulo vestigial.



Figura 3. Protofilas de tacaco con tres lóbulos.



Figura 4. Protofila de tacaco con cuatro lóbulos.



Figura 5. Protofila de tacaco con cinco lóbulos.



Figura 6. Protofila de tacaco con seis lóbulos.



Figura 7. Protofilas de tacaco con siete lóbulos.



Figura 8. Plántulas de tacaco, con dos protofilas de un lóbulo (izquierda), y con dos protofilas de uno y tres lóbulos (derecha).



Figura 9. Protofilas de tacaco, con tres y cuatro lóbulos..



Figura 10. Protofila de tacaco, con tres lóbulos más uno vestigial.

Cuadro 1. Número de lóbulos por protofila, en cinco plántulas de tacaco, a los 91 días después de siembra.

Número de protofila (a partir de los cotiledones)	Número de plántula				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	1	3
3	3+3	4	3	1	1
4	5	5	4	3	5
5	5	7	7	7	5
6	6	7	5	7	5
7	6	7	6	7	7
8	7	7	7	7	7
9	7	7	7	7	7
10	7	7	7	7	7
11	7	6	7	5	nd
12	7	7	7	7	
13	7	6	7	nd	
14	7	7	nd		
15	7	nd			
16	7				

En tres casos, se encontraron lóbulos muy pequeños en la protofila, los que se pueden considerar como vestigiales, pues no guardan proporción ni simetría con los otros lóbulos (figuras 2 y 10). La presencia de estos lóbulos vestigiales puede deberse a un estrés fisiológico durante el desarrollo de la lámina de la protofila.

En general, los lóbulos que ocupan la parte central de la lámina son más largos, en comparación con los que se encuentran en los extremos de ella. En las protofilas con siete lóbulos, los dos lóbulos que se ubican en los extremos son bastante más pequeños que los demás.

Es destacable que en la descripción morfológica de las protofilas del tacaco realizada por otro autor solamente se haya informado de la presencia de cinco lóbulos [8], pero que en el presente trabajo se hayan detectado entre uno y siete lóbulos en ellas; esto podría ser un indicador de un cambio evolutivo reciente en tacaco.

Normalmente, las protofilas de una especie vegetal no muestran diferencias en su morfología, sino únicamente en su tamaño, excepto en los casos en que se presenta el fenómeno de la heteroblastia. Unos investigadores realizaron la caracterización morfológica de dos especies del género *Uncaria* y hallaron que las protofilas de ambas especies son bastante similares, y cuyo tamaño va aumentando conforme al desarrollo de la plántula a lo largo del tiempo [9]; sin embargo, ellos no informaron sobre protofilas con diferente morfología dentro de cada especie.

Otros autores estudiaron la morfología de las plántulas de varias especies del género *Bursera*, y encontraron que cada especie presentó un tipo diferente de protofila; sin embargo, para cada especie se identificó un único tipo de protofila, con un mismo número de lóbulos en cada caso [10], y no se informó sobre variaciones en las características morfológicas de las protofilas dentro de cada especie.

En otro estudio se evaluaron aspectos morfológicos de las plántulas de *Rhamnidium elaeocarpum*, y se describieron las características de las protofilas, las cuales se mantuvieron en forma homogénea hasta la aparición de las nomofilas (metafilas) [11]; es decir, no se hallaron variaciones en las características de las protofilas para esta especie.

Otros autores estudiaron la morfología de las plántulas de *Chloroleucon chacöense* y hallaron que la plántula presenta dos protofilas subopuestas, una de ellas es pinnada y la otra es bipinnada [12]; sin embargo, todas las plántulas mostraron esas dos protofilas, y no informaron de plántulas con protofilas de morfología diferente.

Otro investigador estudió la morfología de las plántulas de dos especies del género *Nepeta*, y halló diferencias en las características de las protofilas de ambas especies [13], pero no informó de diferencias en las protofilas dentro de cada especie.

Ningún investigador había informado anteriormente sobre la existencia de heteroblastia en plántulas de tacaco, es decir, protofilas con diferente número de lóbulos (entre uno y siete), lo que constituye un hallazgo de importancia científica, y que puede ilustrar los cambios evolutivos recientes en esta especie.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo, así como de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al inglés.

Referencias

- [1] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, "Caracterización de frutos de cinco genotipos de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] en Costa Rica," *Tecnología en Marcha*, vol. 30, no. 3, pp. 71-84, 2017.
- [2] R. Lira-Saade, Estudios taxonómicos y ecogeográficos de las Cucurbitaceae latinoamericanas de importancia económica, Roma, Italia: International Plant Genetic Resources Institute, 1995.
- [3] J. León, Botánica de los cultivos tropicales, San José, Costa Rica: IICA, 1987.
- [4] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, "Cuantificación de la variabilidad entre progenies de tacaco (*Sechium tacaco*)," *Revista Pensamiento Actual*, vol. 18, no. 30, pp. 67-77, 2018.
- [5] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, "Variabilidad morfológica en frutos de una población de tacaco [*Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey] a través del tiempo," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 4, pp. 15-24, 2018.
- [6] L. A. Barrera-Guzmán, J. Cadena-Iñiguez, J. P. Legaria-Solano, G. Ramírez-Ojeda, J. Sahagún-Castellanos y M. L. Arévalo-Galarza, "Potential distribution models of *Sechium tacaco* (Pittier) C. Jeffrey in Costa Rica," *Agro Productividad*, vol. 14, 2021.
- [7] E. Flores, La planta: estructura y función, Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2013.
- [8] J. Morales, "Morfología general del tacaco, *Sechium tacaco* (Cucurbitaceae)," *Revista de Biología Tropical*, vol. 42, no. 1-2, pp. 59-71, 1994.
- [9] P. A. Zevallos y Y. Flores, "Caracterización morfológica de plántulas de "uña de gato" *Uncaria tomentosa* (Willd. ex Roemer & Schultes) D.C. y *U. guianensis* (Aublet) Gmelin del Bosque Nacional Alexander Von Humboldt," *Ecología Aplicada*, vol. 2, no. 1, pp. 41-46, 2003.
- [10] A. R. Andrés-Hernández y D. Espinosa-Organista, "Morfología de plántulas de *Bursera* Jacq. ex L. (*Burseraceae*) y sus implicaciones filogenéticas," *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, vol. 70, pp. 5-12, 2002.
- [11] L. A. Silva, J. F. Sales, R. M. Guimarães, J. A. Oliveira y S. C. V. Filho, "Aspectos morfológicos de frutos, semillas e plântulas de *Rhamnidium elaeocarpum* Reissek," *Semina: Ciências Agrárias*, vol. 36, no. 3, pp. 1179-1190, 2015.

- [12] M. A. Zapater, P. S. Hoc, E. C. Lozano, C. B. Flores, C. M. Mamani, M. N. Gil y P. S. Sühring, “ *Chloroleucon chacöense* (Leguminosae): a study on morphometry of fruits and seeds, germinability and development of seedlings,” *Open Access Library Journal*, vol. 3, e3160, 2016.
- [13] I. M. Padure, “Seed germination and morpho-anatomical studies of the seedlings in genus *Nepeta* L. (Lamiaceae, Nepetoideae) in Romania,” *Acta Horti Botanici Bucurestiensis*, vol. 33, pp. 63-70, 2006.

Uso de regresión de soporte vectorial para el control de espuma metálica

Using support vector regression for metal foam control

Alexis Sanabria-Castro¹, Marcela Meneses-Guzmán², Bruno Chiné-Polito³

Fecha de recepción: 8 de octubre, 2021

Fecha de aprobación: 17 de febrero, 2022

Sanabria-Castro, A., Meneses-Guzmán, M., Chiné-Polito, B. Uso de regresión de soporte vectorial para el control de espuma metálica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 42-53.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5891>

- 1 Ingeniero en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: alexsanabriacr@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-9482-2210>
- 2 Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mameneses@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-5922-0145>
- 3 Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: bchine@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6966-5973>

Palabras clave

Máquinas de soporte vectorial; máquinas de soporte de regresión; monitoreo de perfiles; perfil de densidad; espuma metálica; control estadístico de procesos.

Resumen

El monitoreo de perfiles se enfoca en aquellas variables de proceso o producto que son caracterizadas por una relación funcional de esta variable respecto del tiempo o el espacio. El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología basada en Regresión de Soporte Vectorial, SVR, para el monitoreo de perfiles no lineales, e implementarla a los perfiles de densidad de un material celular, espuma metálica de aluminio. La forma de un perfil en control está asociada a ciertas características mecánicas del producto, por lo que un cambio significativo de su forma sería detectado como un fuera de control por un método de monitoreo diseñado para este fin; si esto sucediera, se puede concluir que las propiedades mecánicas de la espuma son diferentes a las requeridas. La metodología considera el cálculo de curvas percentiles que serán la base para definir los límites de un gráfico de control, la estimación de parámetros del modelo de SVR con un Kernel Gausseano y con la ayuda de validación cruzada; se evalúa el desempeño del gráfico de control establecido apoyados en la técnica de bootstrapping. El método propuesto es sencillo de interpretar y práctico. De acuerdo con los resultados, si la forma del perfil de densidad llegara a cambiar más allá de la indicada variabilidad natural del perfil, el método implementado lo detectaría como fuera de control con un error tipo I de 0.341% ($ARL_{real} = 293$).

Keywords

Support vector machines; support regression machines; profile monitoring; density profile; metal foam; statistical process control.

Abstract

Profile monitoring focuses on the process or product variables that are characterized by a functional relationship of this variable with respect to time or space. The objective of this research is to develop a methodology based on Support Vector Regression, SVR, for no linear profiles monitoring and implement it to the density profiles of a cellular material, aluminum metal foam. The shape of a profile is associated to certain mechanic characteristics of a product which means that a significant change in the shape would be detected as an out-of-control observation by a monitoring method designed for this purpose; if this happened, it can be concluded that the mechanic properties would be different from those required. The methodology considers the estimation of percentile curves that will be the basis to define the control chart limits, and the estimation of the parameter Cost and Sigma of a SVR model with a Gaussian Kernel with the aid of cross-validation. The performance of the established control chart is evaluated supported by the bootstrapping technique. The proposed method is practical and of simple interpretation. According to the results, if the shape of the density profile were to change beyond the shape indicated by the natural variability of the profile, the implemented method would detect it as out-of-control with a type I error of 0.341% ($ARL_{real} = 293$).

Introducción

En algunas situaciones, la calidad de un producto o de un proceso se caracteriza mejor por la relación funcional entre una variable de respuesta y una o más variables explicativas; esta relación funcional que se captura y monitorea a lo largo del tiempo se llama “perfil” y la técnica

que se utiliza para su análisis es el Monitoreo de Perfiles, área del Análisis Funcional de Datos (FDA) [1] con un enfoque de Control Estadístico de Procesos (SPC). La literatura ofrece una colección de métodos y técnicas que consideran el tratamiento de perfiles lineales, no lineales y técnicas para reducir la dimensionalidad de los datos, [2], [3], [4]; los estudios se basan en modelos de datos paramétricos y no-paramétricos y la dinámica de funcionamiento consiste en monitorear cambios en los parámetros del modelo por medio de gráficos de control [5]. En muchas aplicaciones un modelo de regresión lineal no es suficiente para representar la forma del perfil, encontrando en literatura propuestas de regresión no lineal, modelos mixtos, splines y wavelets y más recientemente algoritmos de minería de datos, como Redes Neuronales, Árboles de decisión y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM). Inicialmente, SVM fue un algoritmo desarrollado para ser utilizado como un clasificador [6], evolucionando hacia algoritmos con aplicaciones de clasificación y regresión para una amplia gama de problemas, desempeñándose con gran exactitud, bajo sesgo en presencia de datos atípicos y con la ventaja de que no tiende a sobreajustarse a los datos, [7], [8].

SVM aplicado a modelos de regresión, llamado Support Vector Regression (SVR), ha demostrado tener buen desempeño generalizado, baja sensibilidad a la dimensionalidad, y la obtención de una solución única que evita óptimos locales, [9], [10]. En el monitoreo de perfiles no lineales, [11] utiliza las SVR para diseñar límites de control que se adapten a la forma de los datos, esta metodología monitorea las curvas regularizadas con el modelo definido. Partiendo de esta propuesta, el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología basada en máquinas de soporte de regresión para el monitoreo de perfiles no lineales. La propuesta en general entrega paso a paso un procedimiento de control de perfiles no lineales basado en SVR, y su validación se muestra mediante la aplicación a perfiles de densidad de una espuma metálica.

Para conocer la estructura interna de un material celular se recurre a métodos de ensayo destructivos y no destructivos que permitan la medición de esta estructura interna y la detección de defectos. Las propiedades mecánicas como por ejemplo de tracción, compresión o torsión, están directamente relacionadas a esta estructura interna que viene representada por la forma del perfil de densidad del material. Entonces, lo interesante del control de calidad de un material como este consiste en medir, mediante un método no destructivo su perfil de densidad y comparar su forma contra un perfil de densidad en control o ideal, para determinar si su estructura interna corresponde o no a un material conforme; por tanto, se concluye que sus propiedades mecánicas, si se midieran, estarían dentro de los parámetros establecidos como de un material conforme.

En las siguientes secciones estaremos abordando la teoría que fundamenta el desarrollo del trabajo. La sección Metodología especifica el procedimiento seguido para diseñar el sistema de control de calidad y se describe el caso de estudio; La sección de resultados muestra la implementación de la propuesta paso a paso y su discusión. En las conclusiones se resumen los hallazgos principales de la investigación y se sugieren futuras investigaciones.

Marco teórico

El algoritmo de Máquinas de Soporte Vectorial para regresión estima una función multivariada de valores continuos la cual puede ser representada por la ecuación 1.

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + \mathbf{b} \quad (1)$$

Donde:

\mathbf{w} = Un vector de pesos o magnitud del valor del hiperplano

\mathbf{x} = Un vector de variables

\mathbf{b} = Vector de sesgo asociado a la función

La generalización de SVM a SVR se logra introduciendo una región insensible alrededor de la función, llamada margen, que incluyen la mayor cantidad de puntos posible, razón por la cual errores menores que este margen no son penalizados, [6]. El objetivo es encontrar el margen más plano, con el apoyo de vectores de soporte, que mejor se aproxima a la función de valores continuos, mientras que balancea la complejidad del modelo y el error de predicción, para esto, se debe minimizar la norma cuadrada del vector de pesos, [8], [12], ecuación 2.

$$\min_{\mathbf{w}} \frac{\|\bar{\mathbf{w}}\|^2}{2} \quad (2)$$

En la Figura 1. vemos que no todos los puntos están dentro del margen, por lo tanto, el problema no es factible, y se debe introducir las variables de holgura ξ_i , ξ_i^* . Con esto se obtiene el problema de optimización convexa, ecuación 3.

$$\min \frac{1}{2} \|\bar{\mathbf{w}}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i + \xi_i^* \quad (3)$$

Sujeto a las siguientes restricciones;

$$\begin{aligned} y_i - (\mathbf{w}^T x_i + \mathbf{b}) &\leq \varepsilon + \xi_i^* & i = 1 \dots n \\ (\mathbf{w}^T x_i + \mathbf{b}) - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i & i = 1 \dots n \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0 & i = 1 \dots n \end{aligned}$$

Donde:

y_i = Valor real de la variable bajo estudio

\mathbf{w}^T = Vector de pesos

x_i = Valor de la variable de posición

\mathbf{b} = Vector de sesgo asociado a la función

C = parámetro de penalización o costo

ξ_i y ξ_i^* = Variables de holgura que determinen cuantos puntos pueden ser tolerados afuera del margen.

ε = Umbral al partir del cual se penaliza el error entre el valor estimado y el valor real

La primera parte de la ecuación (3) maximiza el margen, minimizando la magnitud de los pesos del hiperplano, la segunda parte de la ecuación minimiza el error de entrenamiento. El parámetro C determina el equilibrio entre la regularidad del hiperplano y la cantidad hasta la cual toleramos desviaciones mayores que el margen. Entre mayor es la magnitud del parámetro de costo C, mayor es el interés en minimizar los errores del modelo, mientras que si este tiende

a 0, se tendría un número alto de puntos mal representados. Por otro lado, entre menor sea el umbral a partir del que se penaliza el error entre el valor estimado y el valor real, el modelo es menos tolerante con los errores. Este problema de optimización cuadrática se resuelve construyendo una función de Lagrange de la función objetivo y sus restricciones, de esta manera se obtienen los valores C, ξ, ε óptimos, [8], [12].

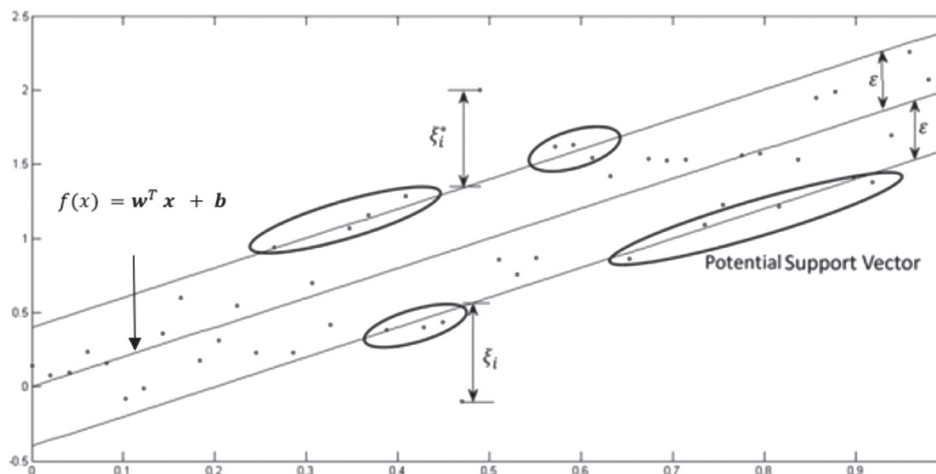


Figura 1. Ejemplo de regresión lineal con SVR.

Fuente: Awad et al. 2015

La figura 1 muestra un ejemplo de datos en los que podemos utilizar la función $f(\mathbf{x})$ lineal. Si la relación entre las variables no es lineal, se requiere una transformación de los datos a una dimensión mayor. Esto generalmente se realiza con una función Kernel, la cual convierte relaciones no lineales en lineales; las restricciones para el problema de optimización se establecen de la siguiente manera,

$$\begin{aligned}
 y_i - (\mathbf{w}^T \phi(x_i) + \mathbf{b}) &\leq \varepsilon + \xi_i^* & i = 1 \dots n \\
 (\mathbf{w}^T \phi(x_i) + \mathbf{b}) - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i & i = 1 \dots n \\
 \xi_i, \xi_i^* &\geq 0 & i = 1 \dots n
 \end{aligned}$$

Donde ϕ es la función kernel, una de las más utilizadas es el kernel RBF Gaussiano.

Cuando se está escogiendo un modelo de regresión o clasificación, se debe evaluar y comparar el desempeño de los modelos bajo estudio, normalmente utilizando un set de datos de entrenamiento para definir los parámetros del modelo modelo y otro de prueba para probar el desempeño del modelo, comparando su resultado con la respuesta real. Como la selección de los datos de prueba y entrenamiento podrían proporcionar sesgo en las métricas de desempeño, se suele utilizar alguna técnica de validación como K fold cross validation que utiliza varios conjuntos de datos, los cuales intercalan entre ellos para ser utilizados como conjunto de entrenamiento o de prueba; es usual que en cada una de las iteraciones se registre una métrica de desempeño para obtener al final un promedio de esta, [13].

Bootstrapping es una técnica de estadística inferencial para obtener un estimado de un estadístico de la población. De una muestra bajo estudio se toman muestras aleatorias con remplazo, de las cuales se obtiene una distribución del estadístico de interés, [14], estimando así los parámetros de la distribución, como la media. En este trabajo utilizaremos esta técnica para estimar el número esperado de muestras tomadas antes de que se presente una señal fuera de control o el ARL (average run length), es una métrica para evaluar y comparar métodos de gráficos de control en la fase I o fase de diseño de los gráficos. Dado que se asume que el proceso está en control, entre mayor sea el ARL mejor es el desempeño del gráfico de control. Se calcula como: $1/\alpha$, donde α es la probabilidad de que una observación se clasifique como fuera de control, cuando en realidad se encuentra en control estadístico (error tipo I), [15].

Caso de estudio

Una espuma metálica (metal foams) es un sólido celular formado por una red de celdas unidas entre sí formando mallas en su matriz interior, con celdas cerradas, [16]; sus propiedades son la baja densidad y las propiedades típicas de los metales que la componen como lo son, mecánicas, térmicas, eléctricas y acústicas. Las espumas son utilizadas en múltiples aplicaciones con objetivos relacionados a absorción de energía, gestión térmica, aislamiento térmico y acústico y para amortiguamiento mecánico y de vibraciones, entre otras. Las propiedades de los materiales son importantes para definir sus aplicaciones [17] y estas dependen no solo de la composición de la aleación con la cual fue manufacturado, sino que también de la estrategia de producción y las condiciones del proceso. La espuma de aluminio analizada en este trabajo proviene de material espumado de precursores formados por compactación de polvos de aleaciones metálicas con agente espumante (powder compact melting technique), el cual es sometido a calentamiento en hornos de convección en moldes; estas son materiales no homogéneos, caracterizados por la presencia de gradientes de densidad, amplia distribución de dimensiones de celdas y defectos, [18], producto de un proceso aún no completamente dominado y la inestabilidad de producción de espumas con propiedades constantes, [19], [16], [17]. Gracias a que la estructura de las espumas metálicas está relacionada al perfil de densidad del material y que su forma está relacionada a las propiedades mecánicas del material, se tiene el interés de entender esta relación y de definir un método indirecto que contribuya al control de estas propiedades mediante el uso de controles no destructivos.

La muestra de espuma de aluminio 170 – 05, figura 2, es cuadrada con sección 166mm por 40 mm. Para medir la densidad se utilizó la técnica de “gamma scanning” descrita en [20]. Entre otras, se tomaron mediciones de frente X (rayos gamma pasan el espesor Z en dirección X) y frente Y (rayos gamma pasan el espesor Z en dirección Y).

El registro de la intensidad de radiación en diferentes puntos de la pieza permite construir un perfil de intensidad. La densidad del material puede ser determinada por medio de la relación que existe entre esta y la atenuación de los rayos gamma, Ley de Beer – Lambert. En este trabajo usaremos los perfiles de intensidad de radiación de frente X y Y. Se registran 39 perfiles cada 4mm, en cada frente; tres mediciones por cada posición, con periodo de muestreo de 30 segundos por medición. Cada perfil está formado de 82 observaciones separadas cada 2 mm, y registrándolas para las posiciones de 0 mm a 162 mm.

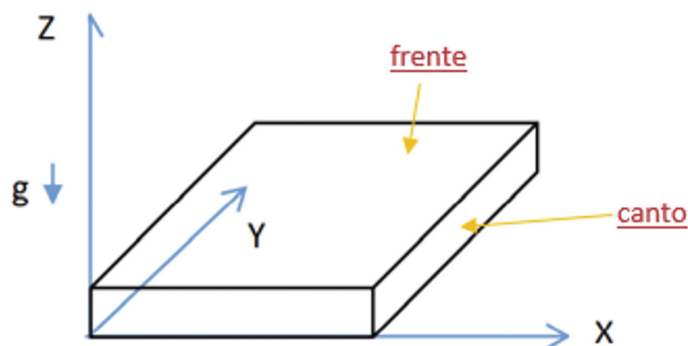


Figura 2. Sistema de referencia para la toma de muestras de la espuma metálica 170 – 05.

Fuente: Bruno et al., 2017

Metodología

Las etapas del análisis y su objetivo fueron desarrolladas con el software R y son:

1. Análisis Exploratorio: Describir los perfiles bajo estudio e identificar y eliminar valores atípicos; estadística descriptiva y visualización.
2. Calcular curvas percentiles que cubra el 99.5% de los perfiles: con los puntos máximos de las mediciones de toda la muestra de perfiles, para cada posición, se determina la curva superior; con los puntos mínimos de las mediciones de toda la muestra de perfiles, para cada posición, se determina la curva inferior. La curva percentil superior e inferior se calcula determinando los percentiles, para cada curva.
3. Selección de parámetro de modelo de SVM: Determinar parámetros de Costo (C) y sigma (σ) para un modelo de SVM con un kernel gaussiano mediante validación cruzada aplicado a la muestra de percentiles superior e inferior. Se obtiene dos pares de parámetros y que son utilizados para regularizar cada percentil superior e inferior y medir cuál de ellos genera un mejor modelo; función `tune(svm, ..., tunecontrol = tune.control(cross = 2))`.
4. Diseño de límites de control para el monitoreo de perfiles no lineales: Determinar límites de control por medio de la regularización de las curvas percentiles superior e inferior con el modelo SVM seleccionado.
5. Regularización de perfiles muestra: Regularizar por medio del modelo de SVM seleccionado la muestra de perfiles bajo estudio.
6. Identificar curvas fuera de control estadístico: Definir un fuera de control de un perfil mediante la cantidad de puntos de un solo perfil que salen de los límites y utilizar este índice de estabilidad como tolerancia, ej. 10%.
7. Analizar comportamiento de los fuera de control: Determinar si existen patrones de comportamiento de los perfiles fuera de control estadístico por posición, y valores afuera de límites de control.
8. Aplicar 1000 iteraciones de la metodología propuesta a perfiles creados por Bootstrapping, evaluando el desempeño de la propuesta por medio de la métrica ARL.

Resultados y Discusión

Análisis exploratorio

Las figura 3 muestra los 39 perfiles del frente X en azul y los 39 perfiles del frente Y en rojo; la densidad es más alta en los extremos, y progresivamente disminuye hacia la parte central, típica forma de un perfil de densidad de este tipo de materiales; los perfiles X, en general, tiene valores de densidad a lo largo de su comportamiento más bajos que el comportamiento de los perfiles del frente Y; los perfiles del frente Y presentan saltos más pronunciados en las posiciones centrales y hacia la derecha que las que presenta el frente X mostrando picos y valles más pronunciados.

Curvas percentiles

En cada posición en el eje hay 78 observaciones que describen la intensidad de radiación registrada en esa posición y cada una de ellas proviene de un perfil diferente. El punto debajo del que se encuentra un 99.5% de los datos (percentil 99.5%) es el 77.61, redondeado es el punto máximo; el punto debajo del que se encuentra un 0.5% de los datos (percentil 0.5%), es el 0.39, redondeado es el punto mínimo. Se calcula el punto máximo y mínimo en cada posición para construir la curva percentil superior e inferior respectivamente, el conjunto de puntos máximos es la curva percentil superior, y el conjunto de puntos mínimos la curva percentil inferior. La media, el punto máximo y mínimo de la curva percentil 99.5% y 0.5%, superior e inferior son de 1106.7 g/cm³ y 730.1 g/cm³ ;1630.0 g/cm³, y 955.1 g/cm³ ;1011.5 g/cm³ y 624.9 g/cm³ respectivamente.

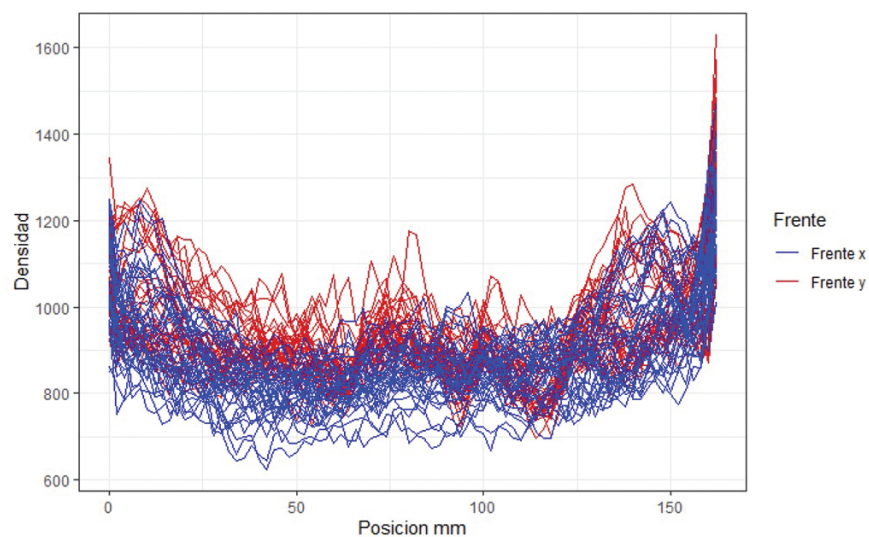


Figura 3. Perfiles de densidad para las mediciones de frentes X-Y de la espuma metálica 170 – 05.

Selección de modelos de SVR

Utilizando un kernel gaussiano y utilizando valores alternativos de los parámetros costo (C) y sigma (σ) que aumenten de manera exponencial para cada parámetro, y validación cruzada con iteraciones con parámetro de desempeño el error cuadrado promedio (MSE), se determina que el modelo con mejor resultado es de parámetros C = 8 y $\sigma = 16$; este modelo se obtiene aplicando el procedimiento a los datos de entrenamiento y es utilizado para regularizar ambas

curvas, la de percentiles superior e inferior y que de esta forma pasan a ser los límites de control del gráfico de control. Las curvas percentiles regularizadas con el modelo son representadas en la figura 4 con el color azul. Con estos límites de control, se puede determinar los perfiles que se encuentran fuera de control estadístico.

Aplicación del modelo

Se aplica un modelo de Máquinas de Soporte Vectorial con sigma de 16 y costo de 8 a cada uno de los 78 perfiles de la muestra, luego se determina si alguno de estos perfiles regularizados tiene puntos fuera de los límites de control. La Figura 4 muestra los 78 perfiles regularizados juntos con los límites superior e inferior del gráfico de control. Se encuentran 9 perfiles fuera de control estadístico (en rojo), cinco son del frente X (55%), perfiles de densidad 11,37,38,12, y 14 y cuatro del frente Y (45%), perfiles de densidad 38,1,17y 32 como muestra la primera columna del cuadro 1.

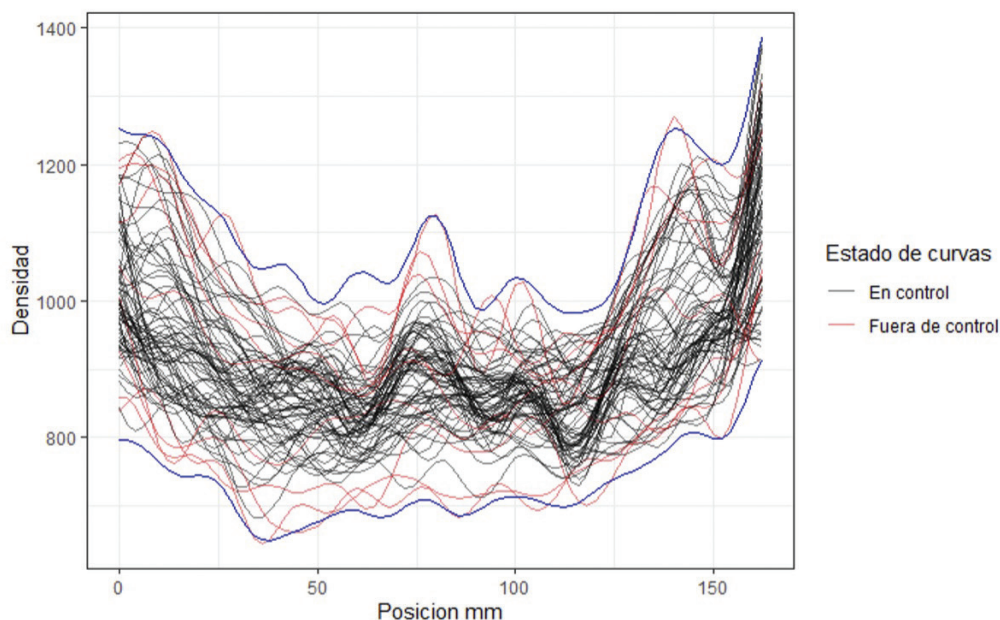


Figura 4. Gráfico de control para los frentes X - Y de la espuma metálica 170 - 05

En las dos siguientes columnas del cuadro se muestra la cantidad de puntos que salen de los límites; de las 33 observaciones fuera de control estadístico, 15 sucedieron en el límite superior (45%), y 18 por el límite inferior (55%). Las 33 observaciones fuera de control estadístico se encuentran distribuidas aleatoriamente a través de la posición. Utilizando como tolerancia para clasificar un perfil fuera de control un índice de inestabilidad mayor al 10%, solamente el perfil 11 en el frente X se encontraría fuera de control estadístico como señala la última columna del cuadro, donde el 100% de las veces que salió de control estadístico fue por el límite superior.

Cuadro 1. Perfiles de densidad fuera de control estadístico para los frentes X-Y de la espuma metálica 170 - 05

Perfil	Fuera de Control LI	Fuera de Control LS	Fuera de control	Porcentaje fuera
11_x	0	11	11	13.41
38_y	5	0	5	6.1
1_y	4	0	4	4.88
17_y	0	3	3	3.66
37_x	3	0	3	3.66
38_x	3	0	3	3.66
12_x	0	2	2	2.44
24_x	0	1	1	1.22
32_y	0	1	1	1.22

Evaluación del desempeño

Se crearon 78 perfiles por Bootstrapping, donde cada perfil es el conjunto de puntos promedio en cada posición entre dos perfiles reales muestreados aleatoriamente. A estos perfiles se les aplica el modelo de SVR propuesto y son evaluados en el gráfico de control definido y se cuenta la cantidad de puntos fuera de control estadístico; este proceso se realiza 1000 veces. En promedio, de cada 78 perfiles, 0.266 de los perfiles son clasificados fuera de control estadístico incorrectamente, la cantidad máxima y mínima de perfiles fuera de control estadístico a través de las 1000 iteraciones es de 3 y 0 respectivamente. Por otro lado, asumiendo que cada uno de los perfiles creados está en control estadístico, se calcula la media de esta distribución, y se estima que hay una probabilidad aproximada del 0.341% de clasificar un perfil fuera de control, cuando se encuentra en control estadístico. Por lo tanto, en control estadístico, se espera que cada 293 perfiles (ARL_{real}), se clasifique un perfil fuera de control incorrectamente.

Conclusiones

Se ha implementado una metodología de monitoreo o control de perfiles no lineales basada en SVR a los perfiles de densidad de una espuma metálica. El modelar el comportamiento de una forma funcional considerada en control, permite determinar un espacio o área de referencia para comparar nuevas mediciones de perfiles limitadas por una curva superior y una curva inferior, que define el espacio dentro del cual una tercera función o perfil podría estar en control si se encuentra dentro de estos límites; si en cambio existieran perfiles de densidad que se salen de estos límites, entonces se clasificaría como un perfil fuera de control y se debería evaluar la gravedad del fuera de control. El método propuesto es sencillo de interpretar, y por lo tanto práctico, y su implementación para el control de perfiles tiene un alcance mayor cuando la forma de este perfil de densidad es asociada a las propiedades mecánicas de la espuma. Si la forma del perfil de densidad llegara a cambiar en forma extraordinaria a los cambios que considera el método implementado, entonces los límites detectarían un fuera de control y se puede asegurar que sus propiedades mecánicas son otras, diferentes a las establecidas. Entonces, los límites de control establecidos para los perfiles de esta espuma, con un nivel alfa de 0.341% ($ARL_{real} = 293$), asegurarían que los materiales equivalentes cuyos perfiles de frentes X - Y se encuentren dentro de estos límites, tendrían las propiedades mecánicas que test mecánicos puedan definir para esta muestra.

Los aportes innovadores de esta propuesta están relacionados al cálculo de las curvas percentiles, los cuales son la base para crear los límites de control, y la estrategia de selección de parámetros del modelo de SVR, que es utilizado para regularizar los límites de control y todos los perfiles antes de ser evaluados en el gráfico de control. Futuras investigaciones pueden considerar formas alternativas para definir los límites de control, evaluar el desempeño de la propuesta y comparar esta con otros métodos para comprobar su eficiencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo al proyecto 1351022.

Referencia

- [1] J. Wang, J. Chiou y H. Muller, "Functional data analysis", *Annual Review of Statistics and Its Application*, vol.17, pp. 1- 41, 2015.
- [2] W. H. Woodall. "Current research on profile monitoring", *Production*, vol.17, pp. 420-425, 2007. <https://www.scielo.br/j/prod/a/S6nScq3CJGWnbsCsByxHfJq/?format=pdf&lang=en>
- [3] L. A. Jones-Farmer, W. H. Woodall, S. H. Steiner y C. W. Champ, "An overview of phase I analysis for process improvement and monitoring", *Journal of Quality Technology*, vol.46, pp. 265-280, 2014. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00224065.2014.11917969>
- [4] M. Maleki, A. Amiri y P. Castagliola, "An overview on recent profile monitoring papers (2008–2018) based on conceptual classification scheme", *Computers & Industrial Engineering*, vol.126, pp. 705-728, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.008>
- [5] M. Meneses-Guzmán, B. Chiné-Polito, F. Rodríguez-Méndez, V. Mussi, "Characterization of aluminium foams produced via a powder metallurgy route", *Proceedings of the 1st Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials/11th National Congress on Experimental Mechanics*, 2017. https://paginas.fe.up.pt/~tem2/Proceedings_TEMM2018/data/papers/7320.pdf
- [6] J. Goddard, S. Gerardo, B. Rosa y M. Gutiérrez, "Un algoritmo para el entrenamiento de Máquinas de Soporte para regresión", *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, vol.17, p. 107–116, 2000. DOI 10.15517/RMTA.V7I1-2.183
- [7] B. Lantz, *Machine Learning with R*, Packt Publishing, 2013.
- [8] M. Awad y R. Khanna, *Efficient Learning Machines: Theories, Concepts, and Applications for Engineers and System Designers*, Springer, pp. 221-232, 2015.
- [9] S. Cuentas, R. Peñabaena-Niebles y E. García, "Support vector machine in statistical process monitoring: a methodological and analytical review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.91, pp. 485-500, 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9693-y>
- [10] M. Reis y G. Gins, "Industrial Process Monitoring in the Big Data/Industry 4.0 Era: From Detection, to Diagnosis, to Prognosis", *Processes*, vol.5, p. 35, 2017.
- [11] J. M. Moguerza, A. Muñoz y S. Psarakis, "Monitoring nonlinear profiles using support vector machines", de *Iberoamerican congress on pattern recognition*, Berlin, Heidelberg, 2007. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-76725-1_60
- [12] A. Smola y B. Scholkopf, "A Tutorial on Support Vector Regression", *Statistics and Computing*, vol.14, p. 199 – 222, 2004.
- [13] P. Refaelizadeh, L. Tang y H. Liu, "Cross – Validation", *Encyclopedia of database systems*, vol.5, pp. 532-538, 2009.
- [14] G. James, D. Witten, T. Hastie y R. Tibshirani, *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*, Springer, 2013.
- [15] D. Montgomery, *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons, 2020.
- [16] J. Banhart, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, vol.46, pp. 559-632, 2001. https://didattica-2000.archived.uniroma2.it/tbs2/deposito/Manufacture_characterisation_and_application_of_cellular_metals_and_metal_foams.pdf

- [17] F. García-Moreno, "Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production", *Materials*, vol.9, p. 85, 2016.
- [18] E. Solorzano, M. A. Rodríguez-Perez, J. A. Reglero y J. A. De Saja, "Density gradients in aluminium foams: characterisation by computed tomography and measurements of the effective thermal conductivity", *Journal of Materials Science*, vol.42, pp. 2557-2564, 2007.
- [19] C. Körner y R. F. Singer, "Processing of metal foams—challenges and opportunities", *Advanced Engineering Materials*, vol.4, pp. 159-165, 2000. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/%28SIC1%291527-2648%28200004%292%3A4%3C159%3A%3AAID-ADEM159%3E3.0.CO%3B2-O>
- [20] F. Rodríguez-Mendez, M. Meneses-Guzmán, B. Chiné-Polito, R. Pereira-Arroyo, "Desarrollo de un sistema automatizado de escaneo por radiación gamma", *Tecnología en Marcha*, vol. 32, 3, pp 87-98, 2019. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7448586>

Efecto inhibitorio del aceite esencial de *Lippia graveolens* sobre *Fusarium oxysporum* en la familia *Solanaceae*. Una revisión

Inhibitory effect of *Lippia graveolens* essential oil on *Fusarium oxysporum* in the *Solanaceae* family. A review

Laura Daniela Albarracin-Gomez¹, Stefany Hortua-Gamboa², Jovana Acero-Godoy³


Fecha de recepción: 23 de setiembre, 2021

Fecha de aprobación: 21 de enero, 2022


Albarracin-Gomez, L.D., Hortua-Gamboa, S., Acero-Godoy, J. Efecto inhibitorio del aceite esencial de *Lippia graveolens* sobre *Fusarium Oxysporum* en la familia *Solanaceae*. Una revisión. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 54-65.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5877>


1 Estudiante Colegio mayor de Cundinamarca. Colombia. Correo electrónico: lalbarracin@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-3360-4009>

2 Estudiante Colegio mayor de Cundinamarca. Colombia. Correo electrónico: shortua@unicolmayor.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0002-0733-9395>

3 Profesora del Colegio mayor de Cundinamarca. Colombia. Correo electrónico: jacerog@unicolmayor.edu.co

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

Palabras claves

Aceite esencial; *Fusarium*; *Lippia Graveolens*; *Solanaceae*; agroquímicos.

Resumen

La agricultura enfrenta diferentes retos, uno de ellos es el generado por microorganismos fitopatógenos, entre estos se encuentran principalmente virus, bacterias y hongos, los cuales producen daños en la cosecha. Uno de los agentes causales de estos problemas es el hongo cosmopolita *Fusarium oxysporum*, el cual afecta a gran cantidad de cultivos, entre los que se encuentran plantas de la familia *Solanaceae*. Generalmente el control de estos patógenos depende de agroquímicos, que si bien eliminan el organismo causal de la enfermedad, generan otros problemas. Por tanto, en el presente documento se realiza una búsqueda sistemática de diferentes investigaciones que evidencian una alternativa biológica y sostenible como lo es el aceite esencial de la planta *Lippia graveolens*, la cual según artículos consultados contiene diferentes alcoholes que a concentraciones de 0,20 y 0,25 µl/ml, logra inhibir el crecimiento de *Fusarium oxysporum* en un 100 % evidenciando así su eficiencia en el control de enfermedades fitopatógenas.

Keywords

Essential oil; *Fusarium*; *Lippia Graveolens*; *Solanaceae* y, agrochemicals.

Abstract

Agriculture faces different challenges, one of them is generated by phytopathogenic microorganisms, among these are mainly viruses, bacteria and fungi, which cause damage to the harvest. One of the causative agents of these problems is the cosmopolitan fungus *Fusarium oxysporum*, which affects a large number of crops, including plants of the *Solanaceae* family. Generally, the control of these pathogens depends on agrochemicals, which, although they eliminate the organism that causes the disease, generate other problems. Therefore, in this document a systematic search is carried out for different investigations that show a biological and sustainable alternative such as the essential oil of the *Lippia graveolens* plant, which according to the articles consulted contains different alcohols that at concentrations of 0.20 and 0.25 µl / ml, manages to inhibit the growth of *Fusarium oxysporum* by 100%, thus demonstrating its efficiency in the control of phytopathogenic diseases.

Introducción

Solanaceae es una familia de plantas con distribución cosmopolita, ya que es capaz de colonizar distintos tipos de hábitats, prefiriendo los de tipo tropical y templado, representando un valor económico importante a nivel mundial, reportando aproximadamente más de 98 géneros y 2,800 especies, siendo la gran mayoría de estas comestibles, las cuales representan aproximadamente el 75% de los alimentos del planeta [1] [2], demostrando así su gran diversidad, ya que se distribuye en todos los continentes excepto en la Antártida [3] y [4], sin embargo se encuentran en mayor concentración en Australia y América Latina. Con respecto a su morfología esta familia va desde hierbas efímeras hasta grandes árboles [5], que pueden presentar flores especialmente hermafroditas, con gran variedad de tamaño, además llegan a ser inodoras, fragantes o fétidas y presentan ovario súpero que puede contener entre 1 o 2 lóculos, los cuales llevan entre 1 y 50 óvulos. Con respecto a sus hojas son generalmente pecioladas, sin espículas e inodoras, además el fruto de las solanáceas pueden ser una baya, cápsula o drupa.

Respecto a los componentes que sus órganos segregan es importante señalar a los alcaloides tóxicos entre los que se encuentra la nicotina, solanina, tropanos y capsaicina [6], así como también se encuentran algunos que son usados en la medicina tradicional, especialmente como agentes antimicrobianos, insecticidas y antiinfecciosos [7]. Como se mencionó anteriormente muchas de las especies de la familia Solanaceae son de gran importancia florística, fitoquímica, etnobotánica única y económica [8] ya que son utilizados como productos alimenticios, que hacen parte de variedad de platos de familias a nivel mundial, entre estos se encuentran *Solanum tuberosum* (papa), *Solanum lycopersicum* (tomate), *Capsicum annuum* (pimiento), entre otras, los cuales pueden ser atacados por *Fusarium oxysporum* [9].

El género *Fusarium* es un grupo de hongos filamentosos distribuidos ampliamente a nivel mundial, siendo miembros activos y abundantes de la microbiota del suelo, generalmente son saprofitos nutriéndose así de materia en descomposición, sin embargo, algunas especies pueden generar diferentes enfermedades en las plantas principalmente en la cosecha, produciendo daños irremediables en el hospedero y por consiguiente grandes pérdidas a nivel productivo y económico [10]. La especie más señalada de ser fitopatológica es *Fusarium oxysporum* ya que cuenta con la capacidad de atacar diversas plantas de importancia agrícola, generando principalmente marchitamiento vascular seguido por la muerte del tejido vegetal; entre las plantas afectadas se encuentran las pertenecientes a las de la familia de las *Solanáceas* las cuales son de gran importancia económica, ya que algunos géneros son demandados a nivel mundial por ser productos alimenticios. Este problema no es reciente, por lo que para controlarlo se han utilizado agroquímicos, los cuales han traído consigo otros problemas como contaminación para el medio ambiente, riesgos para la salud humana y resistencia adquirida por los patógenos [11]. El presente artículo tiene como finalidad recopilar información sobre el uso del aceite esencial de *Lippia graveolens*, pues se sabe que estos aceites son una opción rentable y amigable con el medio ambiente, para la eliminación de diferentes microorganismos como *Fusarium oxysporum*, demostrando así que el campo de la biorremediación a partir de extractos de plantas merece seguir siendo estudiado, ya que puede ayudar en la resolución de muchos problemas a nivel industrial.

***Fusarium oxysporum* y su patogenicidad**

Este hongo es de distribución cosmopolita, el cual puede sobrevivir en el suelo como micelio (conjunto de hifas que forman la parte vegetativa del hongo) o como espora que germina en condiciones adecuadas, este último además de suministrar supervivencia por largo tiempo tras condiciones adversas, también permite la diseminación por viento y lluvia provocando que llegue a múltiples espacios y pueda infectar a otros cultivos, pues es considerado un patógeno oportunista, ya que es capaz de generar enfermedad en plantas humanas y animales, cuando estos se encuentran inmunosuprimidos, además tiene la capacidad de producir metabolitos secundarios que afectan un sin fin de productos agrícolas, lo que hace que este hongo sea el más competitivo de la naturaleza [12], [13]. En cuanto a sus características macroscópicas y microscópicas (figura 1), se dice que es un hongo de color blanco a violeta pálido u oscuro y magenta, con formación de macroconidia ligeramente curvada, con 3-4 septos, con ápice, microconidios ovalados, curvos con o sin tabique y monofialides [14]. Se sabe que *F. oxysporum* es la especie que causa mayor daño económico a los cultivos agrícolas en comparación con cualquier otro patógeno vegetal [15], ya que éste provoca pudrición del tallo y raíces, dado a que su mecanismo de acción es colonizar las raíces de manera patógena, pues dificulta la absorción de agua y nutrientes, alterando el metabolismo de la planta, ya que su objetivo es secuestrar las vías metabólicas secundarias del huésped, para un mejor establecimiento, mediante la producción de toxinas como las fusarinas, ácido fusárico, y moniliformina que son propias de esta especie, las cuales pueden causar efectos nocivos al ser humano y animales

cuando aumentan los niveles de toxicidad [16]. Luego se disemina a través del sistema vascular para habitar en los vasos del xilema de la planta, causando así marchitez y muerte rápida de las plantas, lo que normalmente se conoce como marchitez vascular, que sucede cuando las plantas muestran amarillamiento, que comienza por las hojas más próximas al suelo, la base del tallo adquiere un color oscuro y los haces vasculares se tornan de color pardo oscuro (figura 2). Esta enfermedad es un proceso complejo debido a todos los pasos involucrados, haciendo que este patógeno sea reconocido como el microorganismo que más daño presenta a nivel agrícola. Algunos estudios indican que la especie *F. oxysporum* también presenta variantes patógenas, las cuales se agrupan según la especificidad del hospedador o grupo de hospedadores que infecta, haciendo que este sea uno de los hongos más resistentes frente a diversos organofosforados, pues se ha demostrado que el uso indiscriminado de fungicidas, provoca la aparición de nuevas cepas resistentes, lo que hace que no exista un agroquímico para su control [16], [17], [18], [19].

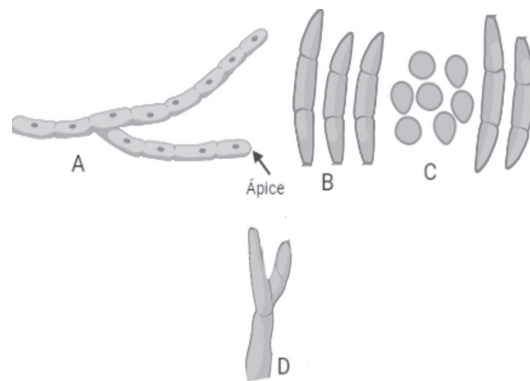


Figura 1. Características microscópicas de *Fusarium oxysporum*. (A) ápice de la hifa. (B) macroconidias. (C) microconidias. (D) monofialides.

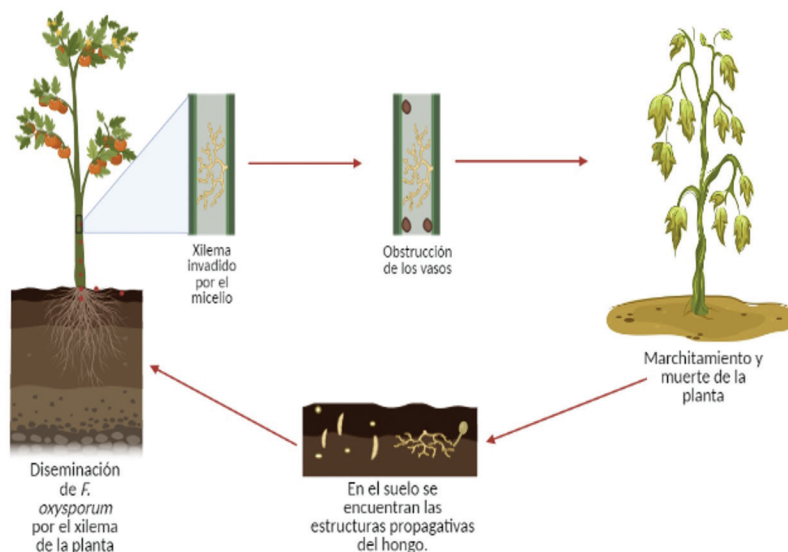


Figura 2. Ciclo de la marchitez por *Fusarium oxysporum*

Control químico

Para el tratamiento de enfermedades causadas por *Fusarium oxysporum* generalmente se utilizan fungicidas como los benzimidazoles, entre los que se incluyen el benomil, carbendazim, tiabendazol, y tiofanato, los cuales si bien atacan y reducen las pérdidas económicas y agronómicas, han desencadenado severos problemas [10], tales como el riesgo para la salud humana y animal, el aumento de la contaminación al medio ambiente y lo más grave es que su manejo indiscriminado ha generado un incremento en la resistencia de los patógenos, los cuales afectan con mayor incidencia, ya que no son sensibles a muchos componentes de estas sustancias químicas [20] [21] [22]. Como consecuencia de lo anterior, diversos investigadores han tratado de buscar alternativas eficaces, que disminuyan costos y efectos secundarios; una de ellas es generar resistencia en la planta por medio de cambios genéticos, para evitar que el patógeno logre invadir el tejido vegetal [20] [23], esta alternativa tiene muchos aspectos positivos, entre los que prevalece el cuidado del medio ambiente y mayor supervivencia frente a factores externos, pero cuenta con diversas limitaciones como alteraciones genéticas no esperadas, esterilidad y baja fertilidad [22]. Otra opción últimamente muy estudiada es el uso de extractos vegetales, los cuales pueden presentar un alto rango de actividad biológica debido a que son fuente rica de metabolitos secundarios, como alcoholes, que según su concentración y tipo pueden ser unos antifúngicos muy potentes, además son económicos, fáciles de extraer y no presentan riesgos conocidos para el medio ambiente [1].

Control biológico

Entre las alternativas para tratar diversas enfermedades causadas por hongos se presenta el uso de aceites esenciales los cuales se refieren a compuestos líquidos aromáticos y volátiles producidos por plantas, los cuales suministran diferentes cualidades, como lo son el olor, el sabor y la capacidad de defenderse del medio externo por ataque de plagas o microorganismos. Estos se pueden extraer de las hojas, raíces, flores, frutos, semillas y madera por procesos físicos simples que no afectan su composición como lo es la destilación, es por ello que han sido usados desde hace varios siglos con fines medicinales, cosméticos y como saborizantes en diferentes alimentos; hoy en día gracias a diversas investigaciones se ha establecido que estas sustancias químicas actúan realizando sinergismos para funcionar, no solo como antibacterianos de amplio espectro, sino también como antivirales, antiparasitarios, antioxidantes y antifúngicos, demostrando así que pueden ser utilizados con múltiples propósitos [24]. En la actualidad se conoce la existencia de aproximadamente 3000 aceites esenciales, de los cuales 300 están disponibles comercialmente; siendo los principales componentes los terpenos / terpenoides y compuestos aromáticos y alifáticos, que se caracterizan por ser de bajo peso molecular [25]. Usualmente, los aceites esenciales están compuestos de dos a tres componentes principales en altas concentraciones (20-95%) y otros componentes presentes en concentraciones más bajas, siendo *Lippia graveolens* una de las plantas más estudiadas para el control de diferentes patógenos.

Lippia graveolens

También conocida como orégano mexicano, orégano del monte, *Lippia berlandieri* entre otros. Es una planta perteneciente a la familia verbenaceae, orden lamiales, clase magnoliopsida y especie *Lippia graveolens*, de aproximadamente dos metros de alto, ramas cortamente pilosas y hojas con forma oblongas o elípticas. Se sabe que esta planta crece en climas secos o semisecos, en terrenos de origen calizo, por lo que la especie tiene potencial de domesticación, además de lo mencionado *Lippia graveolens* ha sido usada ampliamente como aditivo a muchos alimentos, así como también en la medicina tradicional como terapia para múltiples patologías. Todos estos beneficios que ofrece esta planta son gracias a sus múltiples compuestos químicos

entre los que se encuentran los ácidos fenólicos cafeico, clorogénico y rosmarínico; flavonoides, derivados del apigenol, del luteolol; ácido ursólico; sustancias tánicas y elementos minerales que cambian su concentración según donde sea la zona que los cultiven [26]. A diferencia de otras especies del mismo género, esta planta es hermafrodita, siendo esta autocompatible y autofertilizante, lo que facilita su cultivo. El aceite esencial contiene hidrocarburos terpénicos, alcoholes, óxidos, fenoles, éteres, cetonas y ésteres, reconociendo carvacrol, timol, p-cimeno, eugenol, cimeno, pineno y linalol como los que en mayor porcentaje se presentan [27].

Componentes de *Lippia graveolens*

El aceite de orégano ha sido estudiado y ha resultado ser uno de los fungicidas más conocidos. Es natural y seguro, no crea cepas mutantes, puede eliminar microorganismos de todo tipo, desde ambientales como humanos, encontrando a *A. alternata*, *E. coli*, *S. aureus*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger*, entre otros más[28]. Las hojas y el tallo son las partes de la planta más estudiadas, ya que es donde se encuentran todas las propiedades biocidas y fungicidas, demostrando así que el aceite tiene amplia actividad, frente a diversos patógenos. Una gran ventaja del aceite esencial es que dichos patógenos no crea cepas mutantes y elimina posibles efectos secundarios [29], gracias a sus diversos compuestos, encontrándose más frecuentemente el carvacrol, timol y p-cimeno, los cuales le proporcionan estas características.

Carvacrol: Monoterpenoide fenólico, componente principal del aceite de *Lippia graveolens*, pues con concentraciones mínimas (0.05 g/L), se eliminan gran variedad de microorganismos, su mecanismo de acción radica en la capacidad de ubicarse en la membrana, provocando un aumento de la permeabilidad y fluidez, lo que se traduce en un grave deterioro de la misma[30].

Timol: Está estrechamente relacionado con el carvacrol debido a que son isómeros, pues ambos presentan un grupo hidroxilo pero en posición diferente. Es una sustancia fenólica, cristalina e incolora con un olor característico, la cual causa daños estructurales y funcionales en la membrana citoplasmática del patógeno, además interacciona desestabilizando proteínas de membrana y dianas intracelulares[30]. Varios estudios demuestran que el uso de timol resulta una alternativa natural para la formulación de productos destinados a la prevención del desarrollo de los mohos[31].

Cuadro 1. Principales componentes antifúngicos de *Lippia graveolens*.

Componentes principales del aceite esencial			
Familia: <i>Verbenaceae</i> Género: <i>Lippia</i> Especie: <i>graveolens</i>			
Componente	Clasificación química	Mecanismo	Bibliografía
Timol	Fenol, monoterpenoide	Interactúa con las membranas celulares, y objetivos intracelulares afectando su permeabilidad	(Hyldgaard et al., 2012)
Carvacrol	Fenol, monoterpenoide	Aumenta la fluidez y la permeabilidad de las membranas. Genera una alteración de la homeostasis de Ca ²⁺ y H ⁺ , produciendo estrés	Abbaszadeh, et al., (2013)
P - Cimeno	Monoterpeno	Causa dilatación de la membrana citoplasmática. No es tan efectivo cuando se usa sola, pero aumenta su efecto cuando se usa en combinación con carvacrol.	Lopez, et al (2016)

Efecto inhibitorio de *Lippia graveolens* sobre *Fusarium oxysporum*

El extracto vegetal de *Lippia graveolens* está compuesto por múltiples metabolitos secundarios que actuando en sinergia o individualmente pueden generar efectos antimicrobianos y antifúngicos eliminando gran variedad de microorganismos, entre ellos a *Fusarium oxysporum*; la concentración de los componentes del aceite esencial es diferentes dependiendo la zona donde se cultiva, productos orgánicos presentes en el medio, temperatura, cantidad de agua, interacciones bióticas y manejo del cultivo [32]. A pesar de ello el aceite está principalmente constituido por carvacrol, timol y fenoles [33] [34], los cuales generalmente representan el 90 % de las sustancias totales (cuadro 1), siendo estos los que tienen características y estructuras lipofílicas que impiden la respiración y alteración en el transporte de iones en las membranas celulares de *F. oxysporum*, además estos compuestos actúan como captadores de radicales libres mediante el paso de átomos de hidrógeno o electrones, lo cual retarda la oxidación de los lípidos [35], y por último pueden producir cambios en la morfología normal de las hifas reduciendo su diámetro y provocando la lisis en las paredes de las mismas [36]. Por otro lado en cuanto al análisis fitoquímico, se muestra que este aceite posee otros componentes con actividad antifúngica, como lo son los flavonoides, taninos, alcaloides y saponinas, teniendo en cuenta que cada uno de estos compuestos tienen diferente efecto en la eliminación del hongo; en cuanto a la combinación de los flavonoides y alcaloides se dice que precipitan y desnaturalizan las proteínas protoplasmáticas, ya que los hidroxilos penetran la membrana. Por otro lado, los taninos forman complejos con enzimas y otras proteínas, provocando la inhibición de electrones que se transportan a través de la membrana, alterando iones como el hierro y cobre, lo cual impide la función de enzimas esenciales para la supervivencia del microorganismo, y por último, las saponinas que forman complejos con los esteroides, afectando las proteínas y fosfolípidos de las membranas celulares del hongo [37].

Todo esto se traduce en que los compuestos presentes en el aceite esencial, interrumpen la función mitocondrial y de la membrana citoplasmática, ocasionando que los procesos del ciclo celular en la fase S se detengan y provoquen el escape de componentes intracelulares, sin embargo no se conoce el mecanismo de acción específico del aceite, pero se puede atribuir a que este tiene compuestos solubles tanto en agua como en grasas, los cuales son capaces de penetrar la membrana permeable de las células del hongo, pues la lipofilicidad es la principal característica involucrada en la actividad antifúngica de dichos compuestos, dado a que indica el sitio objetivo a atacar [33]. Como bien ya se ha mencionado, *Fusarium oxysporum* es resistente a múltiples fungicidas, y esto es gracias a la membrana que posee, ya que esta puede excluir ciertos compuestos químicos del agroquímico usado para su eliminación, por lo cual el aceite de *Lippia graveolens* tiene una gran ventaja al lograr ingresar a la membrana citoplasmática, pudiendo así erradicar el patógeno que causa marchitamiento en plantas de cultivo de papa, tomate, berenjenas y entre otras muchas más pertenecientes a la familia *solanaceae* [37], [38].

Cuadro 2. Efecto de los componentes de *Lippia graveolens* extraídos por destilación y hidrodestilación contra *Fusarium oxysporum*.

Efecto de <i>Lippia graveolens</i> sobre <i>Fusarium oxysporum</i>				
Extractos	Flores y hojas de <i>L. graveolens</i>			
Compuesto (origen vegetal)	Cantidad extraída	Inhibición del crecimiento	Concentración de Extracto acuoso	Bibliografía
Timol Carvacrol, P-cimeno y demás constituyentes del aceite esencial	0,02 µL/ml	4,2 %		(Hyldgaard et al., 2012)
	0,05 µL/ml	16,8 %		Lopez, et al (2016)
	0,1 µL/ml	53,6 %		Cueto, et al (2010)
	0,15 µL/ml	93,8 %		
	0,2 µL/ml	100 %	40 mg / L	Caceres, et al (2014)
	0,25 µL/ml	100 %		

La combinación de estos compuestos alcohólicos en una misma planta, permite comprender que el aceite esencial de *Lippia graveolens*, logra combatir y eliminar la acción del hongo filamentosos *Fusarium oxysporum*, pero ¿cuál es la cantidad mínima requerida para que se logre un efecto adecuado de inhibición?, varias investigaciones han tratado de solucionar esta pregunta, cómo es la desarrollada por (Cueto, 2010) [39] en la que se extrajo el aceite esencial utilizando destilación al vapor durante 3 horas, y se prepararon diferentes concentraciones (0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20 y 0.25 µl/ml) utilizando Tween 20 esteril 0,5% (v/v), para posteriormente impregnar una caja de petri y evaluar su acción al colocar un disco de agar que contenía el micelio de *Fusarium oxysporum*, se procedió a incubar durante 7 días a 28°C y se observó que en todas las concentraciones hubo efectos antifúngicos, pero la inhibición total se logró a una concentración de 0.20 y 0.25 µl/ml (cuadro 2). En otro [38] se utilizó la segunda fase de la extracción del aceite esencial en la que se recurre a la obtención del extracto acuoso o también llamada agua floral, por medio del contacto de la planta con agua en ebullición, este procedimiento ha sido investigado y se ha comprobado de igual medida su actividad biológica; por lo que en el estudio se obtuvieron tres extractos acuosos de diferentes plantas correspondientes a, clavo (*Eugenia caryophyllata*), canela (*Cinnamomum zeylanicum*) y orégano mexicano (*Lippia berlandieri*) obtenidos mediante la técnica de hidrodestilación, contra diferentes hongos incluyendo el de *Fusarium oxysporum*, de este se concluye que el que mejor logró inhibición para los 6 hongos estudiados fue el extracto acuoso de *Lippia graveolens* con una concentración de 40 mg/L [38]. Demostrando así que los constituyentes del aceite esencial de *Lippia graveolens* representan una gran actividad biocida con pocas concentraciones y con métodos fáciles de extracción, mejorando así tanto la calidad de la planta que es afectada por el hongo, como la parte económica de quien la cultive para posterior comercialización de sus frutos.

Discusión

La protección al medio ambiente y sus recursos se ha convertido en un tema prioritario hoy en día, es por ello que se han buscado nuevas alternativas que logren la sustitución de los agroquímicos, sustancias que contienen componentes altamente contaminantes, los cuales pueden llegar a la atmósfera y fuentes hídricas, perjudicando gravemente a los seres vivos. Una de las alternativas más viables, sostenibles, natural y de fácil aplicación es el uso de aceites esenciales, los cuales son extractos que provienen de diferentes partes de plantas (tallo, flor y hojas), que contienen múltiples componentes capaces de actuar como biocidas. Una de las familias de plantas más estudiadas por su gran cantidad de beneficios es la familia Verbenaceae la cual está constituida por más de 175 géneros y 2.800 especies [40], entre la que se encuentra *Lippia graveolens*, la cual es reconocida por eliminar diferentes fitopatógenos que afectan un sin número de plantas a nivel mundial, debido a su potencial antifúngico, antibacteriano y antivirico, pues sus componentes tienen la capacidad de inhibirlos debido a la variedad de alcoholes que la componen, entre los que se encuentra de manera más representativa el timol en un 40 % a 60% y el carvacrol de un 5% a un 25%, sabiendo que esta variación depende principalmente de los componentes del suelo donde se cultiven [41]. Teniendo en cuenta lo anterior se han realizado diversas investigaciones donde se comprueba la acción de *Lippia graveolens* contra múltiples fitopatógenos como en el caso del hongo *Fusarium oxysporum*, principal causal de la marchitez vascular en plantas de importancia agronómica, pues se sabe que este es un hongo que puede sobrevivir sin necesidad de un huésped primario, atribuyéndole una mejor sobrevivencia [39], en estos estudios se refleja que con pocas concentraciones del aceite esencial se logra un efecto inhibitorio del 100% del hongo *Fusarium oxysporum* a una concentración de 0.20µl/ml, pudiendo ver además que con técnicas sencillas como la hidrodestilación, se logra recuperar componentes biológicamente activos, que actúan como biocidas a una concentración de 40 mg/L, eliminando en el mismo porcentaje a este patógeno. Teniendo en cuenta lo anterior es importante realizar estudios, que indiquen la correcta implementación de este aceite esencial, para el almacenamiento y conservación de las cosechas de papa, tomate, berenjena y otras más pertenecientes a las plantas de la familia Solanaceae, pues son estas las de mayor importancia, ya que representan 75% de los alimentos del planeta [42].

Conclusiones

La gran variedad de compuestos químicos que conforman los aceites esenciales de diversas plantas, hacen de su uso una alternativa llamativa, viable y de fácil implementación, es por tanto que en la presente revisión se ha demostrado que los compuestos fenólicos que contiene el aceite esencial de *Lippia graveolens*, hacen de esta planta una gran aliada para combatir y tratar enfermedades causadas por diferentes agentes patológicos, como en el caso del hongo filamentoso *Fusarium oxysporum*, el cual afecta el proceso de cosecha. Por otro lado, el cultivo de *Lippia graveolens* se puede realizar de manera muy fácil, por lo que el campesino podría implementar su crecimiento, para aprovechar sus múltiples beneficios. Es importante por tanto seguir encaminando las investigaciones hacia el mundo de la biorremediación y posibles sinergias entre plantas que puedan mejorar y potencializar sus efectos.

Referencias

- [1] Heredia-Ortíz, C. Y., Orozco-Guerrero, M. L., Rubiano, C. P., & G, D. A. M. (2019). Actividad antibacteriana de extractos alcohólicos de hojas de *Solanum dolichosepalum* (Bitter). *Informador Técnico*, 83(2), 121-130. <https://doi.org/10.23850/22565035.2061>
- [2] Resources | Free Full-Text | Biodiversity of Food Species of the Solanaceae Family: A Preliminary Taxonomic Inventory of Subfamily Solanoideae. (s. f.). Recuperado 23 de agosto de 2021, de <https://www.mdpi.com/2079-9276/4/2/277>
- [3] Palchetti, M. V. Cantero, J. J., Barboza, G. E. (2020). Solanaceae diversity in South America and its distribution in Argentina. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 92. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190017>
- [4] Vorontsova, M. S., & Knapp, S. (2012). A new species of *Solanum* (Solanaceae) from South Africa related to the cultivated eggplant. *PhytoKeys*, 8, 1. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.8.2462>
- [5] Ganaie, M. M., Reshi, Z. A., Verma, V., & Raja, V. (2018). Family Solanaceae: Taxonomy and modern trends. *Annals of Plant Sciences*, 7(9), 2403-2414. <https://doi.org/10.21746/aps.2018.7.9.1>
- [6] Riqueza y distribución de la familia Solanaceae en el estado de Aguascalientes, México. (s. f.). Recuperado 8 de abril de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982015000100009
- [7] Afroz, M., Akter, S., Ahmed, A., Rouf, R., Shilpi, J. A., Tiralongo, E., Sarker, S. D., Göransson, U., & Uddin, S. J. (2020). Ethnobotany and Antimicrobial Peptides From Plants of the Solanaceae Family: An Update and Future Prospects. *Frontiers in Pharmacology*, 11, 565. <https://doi.org/10.3389/fphar.2020.00565>
- [8] Pollen morphology of family Solanaceae and its taxonomic significance. (s. f.). Recuperado 24 de agosto de 2021, de <https://www.scielo.br/j/aabc/a/XvScGrPRTLsWpD6XM8gmYDQ/?lang=en>
- [9] González, P., & González, P. (2020). Variación morfológica de estructuras reproductivas de las Solanaceae en el Parque Nacional Yanachaga-Chemillen (Perú). *Arnaldoa*, 27(2), 427-458. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.272.27203>
- [10] Villa-Martínez, A., Pérez-Leal, R., Morales-Morales, H. A., Basurto-Sotelo, M., Soto-Parra, J. M., Martínez-Escudero, E. (2015). Situación actual en el control de *Fusarium* spp. Y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*, 64(2), 194-205.
- [11] Hawkins, N. J., Bass, C., Dixon, A., & Neve, P. (2019). The evolutionary origins of pesticide resistance. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 94(1), 135-155. <https://doi.org/10.1111/brv.12440>
- [12] Retana, K., Ramírez-Coché, J. A., Castro, O., Blanco-Meneses, M., Retana, K., Ramírez-Coché, J. A., Castro, O., & Blanco-Meneses, M. (2018). Caracterización morfológica y molecular de *Fusarium oxysporum* F. SP. Apii asociado a la marchitez del apio en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 115-126. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32199>
- [13] Forero-Reyes, C. M., Alvarado-Fernández, A. M., Ceballos-Rojas, A. M., González - Carmona, L. C., Linares-Linares, M. Y., Castañeda-Salazar, R., Pulido-Villamarín, A., Góngora-Medina, M. E., Cortés-Vecino, J. A., & Rodríguez-Bocanegra, M. X. (2018). Evaluación de la capacidad patogénica de *Fusarium* spp. En modelo vegetal y murino. *Revista Argentina de Microbiología*, 50(1), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.11.009>
- [14] Carmona, S. L., Burbano-David, D., Gómez, M. R., Lopez, W., Ceballos, N., Castaño-Zapata, J., Simbaqueba, J., & Soto-Suárez, M. (2020). Characterization of Pathogenic and Nonpathogenic *Fusarium oxysporum* Isolates Associated with Commercial Tomato Crops in the Andean Region of Colombia. *Pathogens*, 9(1), 70. <https://doi.org/10.3390/pathogens9010070>
- [15] Srinivas, C., Nirmala Devi, D., Narasimha Murthy, K., Mohan, C. D., Lakshmeesha, T. R., Singh, B., Kalagatur, N. K., Niranjana, S. R., Hashem, A., Alqarawi, A. A., Tabassum, B., Abd Allah, E. F., Chandra Nayaka, S., & Srivastava, R. K. (2019). *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: Biology to diversity– A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1315-1324. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.06.002>
- [16] Perincherry, L., Lalak-Kańczugowska, J., & Stępień, Ł. (2019). *Fusarium*-Produced Mycotoxins in Plant-Pathogen Interactions. *Toxins*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/toxins11110664>
- [17] Snyder, W. C., Hansen, H. N. (2017). Manejo integrado de la marchitez vascular del tomate [*Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* (sacc.) w.c. Snyder & h.n. Hansen]: una revisión. 12.
- [18] Poletto, T., Muniz, M. F. B., Fantinel, V. S., Harakava, R., Rolim, J. M., Poletto, T., Muniz, M. F. B., Fantinel, V. S., Harakava, R., & Rolim, J. M. (2020). Characterization and Pathogenicity of *Fusarium oxysporum* Associated with *Carya illinoensis* Seedlings. *Floresta e Ambiente*, 27(2). <https://doi.org/10.1590/2179-8087.108917>

- [19] Hernández Amasifuen, A. D., Pineda Lázaro, A. J., & Noriega-Córdova, H. W. (2019). Aislamiento e identificación de *Fusarium oxysporum* obtenidos de zonas productoras de «ají paprika» *Capsicum annum* L. (Solanaceae) en el distrito de Barranca, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 689-698. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26211>
- [20] Duarte-Alvarado, D., Lagos-Burbano, T. C., Lagos-Santander, L. K., Benavides-Cardona, C. A., Duarte-Alvarado, D., Lagos-Burbano, T. C., Lagos-Santander, L. K., & Benavides-Cardona, C. A. (2021). Evaluation of resistance to *Fusarium oxysporum* in genotypes of lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(2), 9603-9614. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.90447>
- [21] Manejo integrado del mal de Panamá [*Fusarium oxysporum* Schlechtend.: Fr. Sp. Cubense (E.F. SM.) W.C. Snyder & H.N. Hansen]: Una revisión | *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. (s. f.). Recuperado 24 de agosto de 2021, de <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/1240>
- [22] Ramu, V., Venkatarangiah, K., Krishnappa, P., Shimoga Rajanna, S. K., Deeplanaik, N., Chandra Pal, A., & Kini, K. R. (2016). Identification of Biomarkers for Resistance to *Fusarium oxysporum* f. Sp. Cubense Infection and in Silico Studies in *Musa paradisica* Cultivar Puttabale through Proteomic Approach. *Proteomes*, 4(1), 9. <https://doi.org/10.3390/proteomes4010009>
- [23] Tapiero, A. L. (1999). Resistencia duradera de plantas a las enfermedades. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 3(1), 36-40.
- [24] Gerardo, R., Quezada F. H., Lara M., Medina T., Pérez L. M., (2011). Parámetros ambientales y abundancia del orégano. [online] *Redalyc.org*. Available at: <<https://www.redalyc.org/pdf/4419/441942925008.pdf>> (16 de marzo de 2021).
- [25] Villada, L. A. G. (2018). Aceites esenciales: un mercado potencial para el aprovechamiento de la biodiversidad colombiana. *Ingeniería y Sociedad*, 13 (2018), 22-28.
- [26] Soto-Domínguez, A., García-Garza, R., Ramírez-Casas, Y., Morán-Martínez, J., Serrano-Gallardo, L. B. (2012). El Extracto Acuoso de Orégano (*Lippia graveolens* HBK) del Norte de México Tiene Actividad Antioxidante sin Mostrar un Efecto Tóxico in vitro e in vivo. *International Journal of Morphology*, 30(3), 937-944. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022012000300029>
- [27] Ortega-Nieblas, Ma. M., Robles-Burgueño, Ma. R., Acedo-Félix, E., González-León, A., Morales-Trejo, A., Vázquez-Moreno, L. (2011). Chemical composition and antimicrobial activity of oregano(*Lippia palmeri* S. WATS) ESSENTIAL OIL. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(1), 11. <https://doi.org/10.35196/rfm.2011.1.11>.
- [28] Lopez, L.-R. (2018). Efecto antifúngico de emulsiones a base de aceite esencial de orégano mexicano (*Lippia graveolens*), contra *Candida albicans*. 4. <https://www.medigraphic.com/pdfs/saljalisco/sj-2018/sj181g.pdf>
- [29] Puente, E. O. R., Bracamontes, J. J. J., López, I. G. R., & Peña, R. J. H. (2018). Evaluación de la actividad antibacteriana in vitro de aceites esenciales de orégano y tomillo contra «*Ralstonia solanacearum*». *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, Extra 20, 4251-4261.
- [30] Hyldgaard, Morten, Tina Mygind, y Rikke Louise Meyer. 2012. «Essential Oils in Food Preservation: Mode of Action, Synergies, and Interactions with Food Matrix Components». *Frontiers in Microbiology* 3. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3265747/> (16 de marzo de 2021).
- [31] Sofía, B., Cecilia, D., Roberto, R., Sofía, B., Cecilia, D., Roberto, R. (2015). Evaluation of thymol to antifungic control on paint films. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20(3), 699-704. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620150003.0073>
- [32] Arriola, V. A. (s. f.)Variación en la composición química del aceite esencial de *Lippia graveolens*, en poblaciones silvestres de Yucatán, y su relación con factores edafoclimáticos.. 77
- [33] Peschiutta, M. L., Arena, J. S., Ramirez Sanchez, A., Gomez Torres, E., Pizzolitto, R. P., Merlo, C., Zunino, M. P., Omarini, A. B., Dambolena, J. S., & Zygodlo, J. A. (2016). Effectiveness of Mexican oregano essential oil from the Dominican Republic (*Lippia graveolens*) against maize pests (*Sitophilus zeamais* and *Fusarium verticillioides*). *Agriscientia*, 33(2), 89-97. artículo sobre un estudio de lipia graveols https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/24334/CONICET_Digital_Nro.c288cc30-1cdd-419f-bc40-70f7671e2f1e_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [34] Estrada Cano, C., Anaya Castro, M. A., Castellanos, L. M., Antonio Garcia Triana, N. A. O., & Ochoa, L. H. (2017). Antifungal Activity of Microcapsulated Clove (*Eugenia caryophyllata*) and Mexican Oregano (*Lippia berlandieri*) Essential Oils against *Fusarium oxysporum*. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 09(01). <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000342>
- [35] Rodriguez-Garcia, I., Cruz-Valenzuela, M. R., Silva-Espinoza, B. A., Gonzalez-Aguilar, G. A., Moctezuma, E., Gutierrez-Pacheco, M. M., Tapia-Rodriguez, M. R., Ortega-Ramirez, L. A., & Ayala-Zavala, J. F. (2016). Oregano (*Lippia graveolens*) essential oil added within pectin edible coatings prevents fungal decay and increases the antioxidant capacity of treated tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(11), 3772-3778. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7568>

- [36] Perczak, A., Gwiazdowska, D., Gwiazdowski, R., Juś, K., Marchwińska, K., & Waśkiewicz, A. (2019). The Inhibitory Potential of Selected Essential Oils on *Fusarium* spp. Growth and Mycotoxins Biosynthesis in Maize Seeds. *Pathogens*, 9(1), 23. <https://doi.org/10.3390/pathogens9010023>
- [37] Tucuch-Perez, M. A., Arredondo-Valdes, R., & Hernandez-Castillo, F. D. (2020). Antifungal activity of phytochemical compounds of extracts from Mexican semi-desert plants against *Fusarium oxysporum* from tomato by microdilution in plate method. *Nova Scientia*, 12(25), Article 25. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2345>
- [38] Cáceres Rueda de León, I., Colorado Vargas, R., Salas Muñoz, E., Muñoz Castellanos, L. N., & Hernández Ochoa, L. (2013). Actividad Antifúngica in vitro de Extractos Acuáticos de Especies contra *Fusarium oxysporum*, *Alternaria alternata*, *Geotrichum candidum*, *Trichoderma* spp., *Penicillium digitatum* y *Aspergillus niger*. *Revista mexicana de fitopatología*, 31(2), 105-112.
- [39] Cueto-Wong, M. C., Rivas-Morales, C., Alanís-Guzmán, M. G., Oranday-Cárdenas, A., Amaya-Guerra, C. A., Núñez-González, A., Samaniego-Gaxiola, J. A., & Cano-Ríos, P. (2010). Antifungal properties of essential oil of mexican oregano (*Lippia berlandieri*) against *Fusarium oxysporum* f. Sp. *Lycopersici*. *Revista Mexicana de Micología*, 31, 29-35.
- [40] Acero-Godoy, J., Guzmán-Hernández, T., Muñoz-Ruíz, C. (2019). Revisión documental de uso de los aceites esenciales obtenidos de *Lippia alba* (Verbenaceae), como alternativa antibacteriana y antifúngica. *Revista Tecnología en Marcha*, 32(1), 3-11. <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4114>
- [41] Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, ESG y Staver, CP (2018). Marchitez por *Fusarium* del banano: conocimientos actuales sobre epidemiología y necesidades de investigación para el manejo sostenible de enfermedades. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1468. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- [42] Shaaban, H., & El-Ghorab, A. (2012). Bioactivity of essential oils and their volatile aroma components: Review. *Journal of Essential Oil Research*, Vol. 24, 203-212. <https://doi.org/10.1080/10412905.2012.659528>

Simulación de plasma y diseño de sistemas para operación y diagnóstico en el Tokamak esférico MEDUSA-CR

Plasma Simulation and system design for operation and diagnosis in the spherical Tokamak MEDUSA-CR

Luis Alonso Araya-Solano¹, Arnoldo Ramírez-Jiménez²,
Ricardo Solano-Piedra³, José Esteban Pérez-Hidalgo⁴,
Iván Vargas-Blanco⁵, Marvin Hernández-Cisneros⁶

Fecha de recepción: 8 de marzo, 2022

Fecha de aprobación: 2 de junio, 2022

Araya-Solano, L.A., Ramírez-Jiménez, A., Solano-Piedra, R.,
Pérez-Hidalgo, J.E. Vargas-Blanco, I., Hernández-Cisneros,
M. Simulación de plasma y diseño de sistemas para operación y diagnóstico en el Tokamak esférico MEDUSA-CR.
Tecnología en Marcha. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023.
Pág. 66-75.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6153>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: luaraya@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7941-821X>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: aaramirez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7090-4465>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: risolano@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-3092-8654>
- 4 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: jose.perez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7184-9974>
- 5 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: ivargas@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-9568-1598>
- 6 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: marhernandez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-6316-8204>

Palabras clave

Tokamak esférico; plasma; fusión termonuclear controlada; equilibrio MDH; ondas de Alfvén; diagnósticos magnéticos.

Resumen

Este proyecto simuló escenarios de confinamiento que buscan analizar diferentes formas de la sección transversal del plasma y de esta manera prever el parámetro beta óptimo en un tokamak esférico de baja razón de aspecto como lo es MEDUSA-CR. Además, se busca diseñar sistemas para operación y diagnóstico en este dispositivo. Finalmente, en este proyecto proponemos un experimento único como prueba de principio utilizando antenas RF para inducir ondas de Alfvén en un Tokamak esférico. Las simulaciones de las interacciones del plasma con las ondas electromagnéticas RF y ECRH permiten explorar en este dispositivo escenarios de calentamiento optimizado que también son del interés de la comunidad científica debido a que la alta temperatura es un requisito indispensable para procesos de fusión.

Keywords

Spherical Tokamak; plasma; thermonuclear controlled fusion; MDH equilibrium; Alfvén waves; magnetic diagnostics.

Abstract

This project simulated confinement scenarios that seek to analyze different shapes of the plasma cross section and thus affect the beta parameter in a low aspect ratio spherical tokamak such as MEDUSA-CR. In addition, it seeks to design systems for operation and diagnosis in this device. Finally, in this project we propose a unique proof-of-principle experiment using RF antennas to induce Alfvén waves in a spherical Tokamak. Simulations of plasma interactions with RF and ECRH electromagnetic waves allow exploring optimized heating scenarios in this device that are also of interest to the scientific community because high temperature is an essential requirement for fusion processes.

Introducción

La comprensión generalizada de los profundos efectos del cambio climático y la creciente demanda energética del ser humano ha hecho que se preste cada vez más atención a la necesidad de generar energía con bajas emisiones de carbono y en grandes cantidades, a partir de una fuente de energía segura, limpia, respetuosa del medio ambiente y cuyo reactivo sea abundante.

Ongena and Van Oost [1] indica que, con un gramo de hidrógeno (deuterio y tritio) en estos dispositivos de fusión termonuclear controlada con las características idóneas de funcionamiento, se producirían hasta 26 000kWh. Esto convierte a estas máquinas en una de las opciones factibles para abastecer la demanda energética futura de la humanidad y una línea de investigación que se debe seguir explorando hasta alcanzar este fin. El sector privado ha mostrado un creciente interés en la investigación en fusión. En una encuesta realizada por la Fusion Industry Association y la UK Atomic Energy Authority se reportó un crecimiento acelerado en el número de empresas privadas que trabajan en pro de la fusión nuclear en los últimos 30 años. El estudio indica que 15 de las 23 empresas encuestadas (65 %) se fundaron en la última década, y 12 de ellas (52 %) solo en los últimos 5 años. En esta encuesta, las empresas de fusión declararon casi \$ 1 900 000 000 (USD) de financiamiento privado hasta la fecha, y más de

\$ 85 000 000 (USD) adicionales en subvenciones y otros fondos de los gobiernos. La mayoría de las empresas encuestadas consideró que se logrará energía de fusión en algún momento de la década de 2030 y fusión para la propulsión espacial en la década de 2030 o 2040. El parámetro beta se define como el cociente de la presión cinética y la presión magnética en el plasma, conociéndose que su incremento favorece las condiciones para que se alcancen procesos de fusión nuclear y por tanto es un área de mucho interés dentro de dispositivos de tipo Tokamak. Resolver este problema se vuelve necesario y pertinente pues como hemos mencionado la investigación en fusión nuclear tiene por objetivo una nueva fuente de energía, segura, limpia, respetuosa del medio ambiente, que utiliza el hidrógeno -el elemento más abundante del universo- en vez de materiales radiactivos como los reactores de fisión nuclear convencionales.

El problema en este proyecto se abordó mediante la simulación de equilibrio magneto-hidrodinámico del plasma con sección transversal en forma de “frijol”, forma que se puede crear mediante un bobinado sobre el eje toroidal externo a la cámara de vacío en MEDUSA-CR y cuyos resultados preliminares indican una mejora en el confinamiento del plasma [2]. Complementariamente, en este proyecto se simularon nuevos escenarios de calentamiento del plasma que permitan subir la temperatura del plasma, requisito también indispensable para alcanzar condiciones de fusión. El calentamiento ECH como pre-ionización y buscar un escenario novedoso de calentamiento por ondas Alfvén también propuesto por nuestro grupo de investigación son elementos importantes para el progreso en este campo. Adicional, se diseñaron en este proyecto sistemas de operación y diagnósticos que permitan corroborar experimentalmente estos mejorados escenarios de confinamiento y calentamiento. Aunque con este equipo no se pueden alcanzar las condiciones de fusión, la investigación permitirá contribuir al conocimiento de fenómenos y al desarrollo de tecnología que puede ser escalada en dispositivos futuros para la fusión nuclear.

Aunque MEDUSA-CR se construyó inicialmente con fines educativos, es posible que se aborden algunos temas interesantes a pesar de su tamaño relativamente pequeño. Sirve principalmente para combinar conocimientos elementales entre la física y la ingeniería involucrada en descargas de plasma controladas y temas relacionados con la fusión, que a su vez podrían abordar conceptos de diseño relevantes para tokamaks esféricos y convencionales salvaguardando la relación costo-beneficio de la operación del dispositivo.

Materiales y métodos (metodología)

Códigos computacionales de equilibrio MHD

Las simulaciones de equilibrio MHD se realizaron a partir de los códigos desarrollados por la comunidad de plasmas y fusión alrededor del mundo. Algunos códigos son abiertos y pueden ser descargados en repositorios, otros se obtuvieron a través de contactos con las personas que integran esta comunidad. En conjunto, los códigos utilizados forman un flujo de trabajo con el que se pueden obtener diversos resultados relacionados con el equilibrio MHD. En particular, nuestro flujo de trabajo usó las rutinas VMEC, MATLAB-VMC, SIESTA, FIESTA, DESCUR y POINCARE.

Inicialmente hubo que encontrar versiones adecuadas de los códigos, por lo que primero se obtuvieron aquellos que estaban disponibles en repositorios. De esta manera se identificó el conjunto de rutinas STELLOPT. El código de STELLOPT está disponible en el siguiente repositorio: <https://github.com/PrincetonUniversity/STELLOPT> con su documentación respectiva. Las rutinas VMEC, MATLAB-VMC y DESCUR forman parte de STELLOPT y fueron estas las

versiones que se utilizaron. Seguidamente, a falta de conseguir las rutinas SIESTA y POINCARE, se hicieron solicitudes a colegas de la comunidad de fusión. La amable colaboración del Dr. Julio Martinelli de la UNAM hizo posible la adquisición de los códigos.

Una vez que se contó con los códigos se procedió a su instalación, la cual se realizó en una estación de trabajo de "plasmaubuntu" del Laboratorio de Plasmas del TEC. Para optimizar los recursos computacionales, contar con estabilidad y aprovechar una serie de ventajas del uso de software libre, se instaló en la estación de trabajo un sistema operativo GNU/LINUX, específicamente Ubuntu 18.04. Cabe destacar que la mayoría de las rutinas mencionadas de equilibrio MHD solo están disponibles para su instalación en sistemas UNIX, como es el caso de GNU/LINUX, lo que justifica la selección del sistema operativo para "plasmaubuntu".

Código computacional para la propagación de ondas

Para la propagación de ondas de Alfvén en el plasma se escribió un código computacional abierto, en el lenguaje de programación Python en un Jupyter Notebook, que condensa la teoría y la programación relevantes. El código está disponible en el repositorio de PlasmaTECITCR de Gitlab. Este código calculó la relación de dispersión para un eslabón infinito de plasma no uniforme con los datos obtenidos del equilibrio magnetohidrodinámico calculado por VMEC, en el modo fixed boundary. Se trabajó con la magnitud del campo magnético del vacío en uno de los cortes toroidales del plasma.

Se condicionó el análisis a la propagación de ondas electromagnéticas en la coordenada $z=0$ y con una dependencia en la coordenada x (considerada en este trabajo como la dirección radial), según lo propuesto por Vlad et al. [3]. Luego, se calculó el perfil de la magnitud de la velocidad de Alfvén en la coordenada x . Por último, se construyeron las soluciones de la relación de dispersión para el espectro continuo de las ondas de Alfvén en el plasma, denominados shear alfvén y magneto-acústicos. La resonancia de los modos de propagación de ondas de Alfvén se analiza a partir de la frecuencia ciclotrónica iónica en el modelo Hall-MHD bajo ciertas consideraciones de velocidad de fase, número de onda y campo magnético. En el caso del modo de propagación magnetoacústico, la razón de frecuencias no llegó a ser uno, por tanto, no se identificaron resonancias, por lo que se consideró como un modo de propagación intermedio. Esto implicó un modo de propagación con una velocidad de fase intermedia entre los modos magnetoacústico rápido y magnetoacústico lento. En el modo de propagación shear alfvén, al estar desacoplado de los modos de propagación magnetoacústica por el estado intermedio, se presentaron resonancias en los puntos donde la frecuencia de las ondas sea igual a la frecuencia iónica ciclotrónica en cinco posiciones radiales. En estos puntos fue donde la energía de la radiación electromagnética se acumuló y el campo magnético de las ondas incidentes aumentó de forma estocástica, por lo que prohibió a la radiación viajar por el plasma [4]. Este modo de propagación se catalogó como Slow Alfvén wave a raíz de que su velocidad de fase es menor a la velocidad de Alfvén [5].

Sistema de calentamiento ECRH para MEDUSA-CR

Tomando en cuenta la frecuencia de resonancia ciclotrónica electrónica del campo magnético en MEDUSA-CR, se seleccionó la fuente de microondas más adecuada para la aplicación y así como la potencia máxima que puede manejar el sistema. A esto se le sumó todo el sistema de componentes necesarios para entregar esa potencia en la cámara de vacío y sus respectivos sistemas de protección. Para todo esto se utilizó la experiencia ya adquirida en el Stellarator SCR-1. Tomando como referencia los componentes necesarios identificados; se ubicaron proveedores con la experiencia y capacidad para la venta de estos.

Potencia y Sistema de control para la operación Tokamak MEDUSA-CR

Se definen tres entradas del sistema de alimentación: la fuente de energía, las señales de control y las corrientes parásitas que se pueden generar en circuitos de alta potencia como el que se está trabajando. Iniciando desde la fuente de energía, se estableció como suministro un banco de capacitores que almacena la potencia necesaria para poder accionar las bobinas. Como se tienen 3 bobinas, la energía se distribuye en 3 bancos de capacitores especializados para cada una, esto se debe a que un solo banco no es capaz de distribuir la potencia necesaria y propagarla a través del sistema sin producir demasiadas pérdidas, además se tendría un exceso de energía para varias de las bobinas. Se observa que cada banco dará lo necesario para generar las corrientes y voltajes deseados en la salida. Seguidamente, para las bobinas OH y TF, se debe realizar un proceso de conversión para alcanzar el requerimiento de una señal pulsante en cada una, por lo que se define un convertidor específico para cada una que provee los pulsos que necesitan para generar los campos magnéticos que confinan el plasma. Para la bobina VF, como solo se requiere corriente continua, se establece un único convertidor DC-DC que requiere menos potencia que los otros convertidores. La tercera entrada consiste en las diferentes señales de control que van a manejar los drivers de los componentes semiconductores. Estas señales van a ser manipuladas en un sistema integrado que realiza todos los cálculos que se necesitan para lograr los pulsos o la señal DC respectivamente para cada bobina. Para establecer el control será necesario conocer la topología que se va a usar y los valores de transmutación de los semiconductores, además de una técnica de control. El plasma generado dentro de la cámara de vacío, producto del confinamiento magnético exitoso, no se considera una salida del sistema de alimentación contemplado en este proyecto, pues es el resultado de varios sistemas trabajando en conjunto y sus propiedades no pueden ser simuladas.

Diagnósticos magnéticos para MEDUSA-CR

Para el lazo diamagnético las corrientes fueron consideradas como flujos poloidales. Para un lazo diamagnético de N vueltas con un radio menor de a_v , la corriente diamagnética se calculó

$I_s = \frac{p \perp >}{B_\phi}$ considerando la geometría de la cámara de vacío, según Wootton [6] la corriente diamagnética se calculará de la siguiente forma:

$$I_s = \frac{1}{NM} \left[\int_0^t \varepsilon dt + \frac{L}{\Omega} \varepsilon \right] \quad (1)$$

Donde M y L son áreas de la cámara de vacío y Ω una razón de perímetros

El arreglo de las bobinas de Mirnov, que en total serán 6 bobinas equidistantes con una sección transversal poloidal de bajo beta poloidal serán instaladas dentro de la cámara de MEDUSA-CR. El beta poloidal caracteriza la razón entre la presión de plasma y la presión del campo magnético en una sección transversal y se describe en la siguiente ecuación.

$$\beta_p = \frac{8\pi}{\mu_0 I_p^2} \int_{S_\phi} p S_\phi \quad (2)$$

La bobina de Rogowski es toroidal y mide corriente eléctrica. La diferencia de potencial en la bobina es proporcional al número de vueltas N en la bobina y a la derivada del tiempo del flujo magnético, y la corriente se obtuvo de la Ley de Ampere, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$V_{Rgw} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

$$I = -\frac{2\pi R_{Rgw}}{\mu_0 N a_{Rgw} b R_{gw}} \left(\int V_{Rgw} , dt \right) \quad (4)$$

Resultados

El código DESCUR se utilizó para calcular los coeficientes de una serie de armónicos de Fourier, obtenidos a partir de las coordenadas de la última superficie de flujo magnético de MEDUSA-CR. La figura 1 presenta las coordenadas radial y vertical obtenidas de esta última superficie.

La magnitud del campo magnético obtenida a partir de MAKEGRID utilizando solo el campo de las bobinas toroidales se presenta en la figura 2.

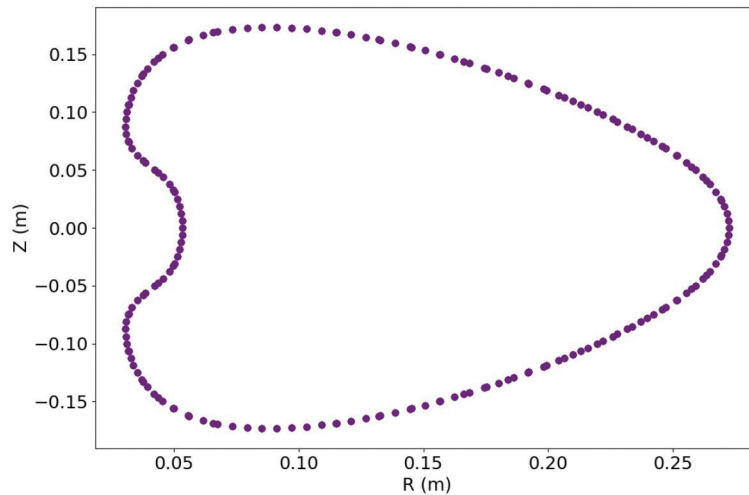


Figura 1. Superficie de flujo magnético calculada a partir de los coeficientes de la serie armónica de Fourier para MEDUSA-CR.

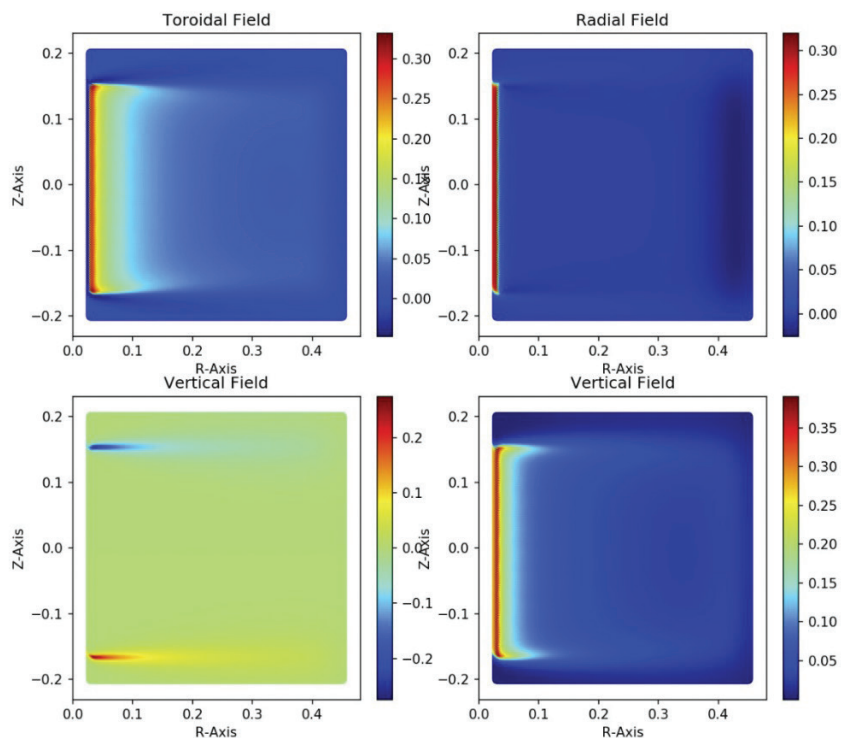


Figura 2. Campo magnético de MEDUSA-CR producido únicamente por las bobinas toroidales. La barra muestra el valor de campo magnético en unidades de Tesla.

Con los archivos modificados utilizando los códigos anteriormente vistos, se precede a ejecutar las rutinas VMEC-MATLAB. Estas rutinas son las que nos permiten visualizar los resultados de VMEC. Para hacer usos de los archivos se debe de agregar la librería para la lectura de archivos netCDF, además de ejecutar ciertos comandos según el script que se esté utilizando y especificar en algunos casos el parámetro del arreglo “extcur” de la corriente en las bobinas de MEDUSA-CR. El resultado en el modo de simulación de “frontera fija” se muestra en la figura 3.

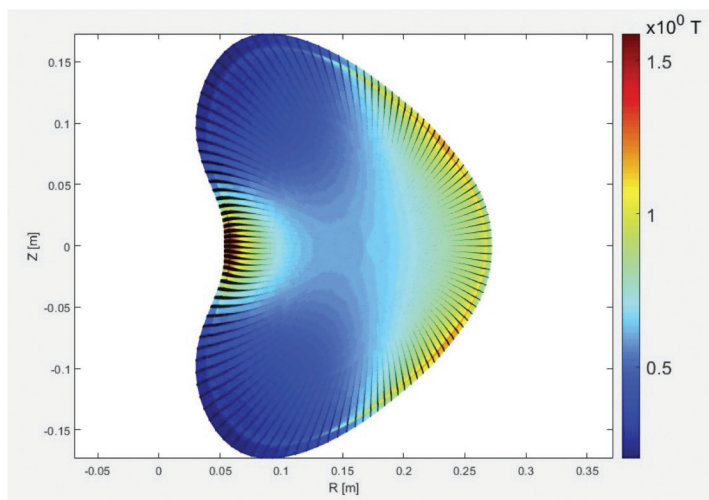


Figura 3. Distribución del campo magnético para MEDUSACR según VMEC en su modo fixed.

Los parámetros de elongación y triangularidad se obtienen de la última superficie magnética cerrada LCFS (Last Closed Flux Surface) ó “separatrix”. El cambio del parámetro beta según la variación de la triangularidad y elongación se muestra en la figura 4.

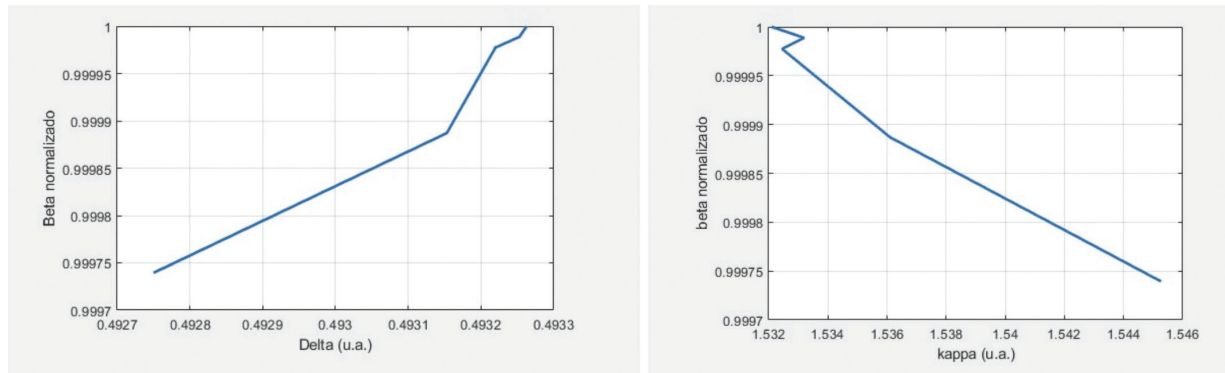


Figura 4. Beta de MEDUSACR en función de la triangularidad (izquierda) y elongación (derecha).

El Tokamak esférico MEDUSA-CR permite calentamiento ECR lazando las microondas desde el lado de alto campo, en inglés High Field Side (HFS) y desde el lado de bajo campo, en inglés Low Field Side (LFS). Por lo anterior se seleccionó un girotrón de rango medio, a una frecuencia de 30 GHz y una potencia entre 50 kW y 100 kW, similar al empleado en ETE [7]. La idea es solicitar ayuda técnica y precios especiales para el Laboratorio de Plasmas del TEC, dado que un girotrón, con las especificaciones apuntadas, de 30 GHz y 100 kW, tiene un costo de más de \$20 000 (USD).

El lazo diamagnético se construye con un alambre de sección transversal de 1,2 mm de diámetro, con un diámetro interno de 50 mm y uno externo de 54 mm, el material para implementar el soporte mecánico de este diagnóstico es resina fenólica con un grosor de 0,85 mm. El cable utilizado para construir el lazo es 28 AWG. Se tienen dos lazos de flujos, interno y externo, con diámetros de 50,15 mm y 55,85 mm respectivamente y áreas de encierro de aproximadamente 1975 cm² y 2450 cm² respectivamente.

Las bobinas de Mirnov se acomodaron en el eje poloidal de manera equidistante con un total de 6 bobinas, este grupo de bobinas se repite en 6 diferentes posiciones en el eje toroidal, con un ángulo de 60° para ambos ejes y fuera de la cámara de MEDUSA-CR. Las mediciones que se obtengan de las bobinas proporcionan información tanto de las oscilaciones de Mirnov como de turbulencia.

Las bobinas de Rogowski se fabricaron con un alambre de cobre con diámetro de 1,2 mm 26 AWG, y se colocan externas al plasma generado dentro de la cámara, con la finalidad de medir la integral de contorno del campo magnético que atraviesa la superficie encerrada. La señal de corriente incluye las contribuciones del flujo de corriente en las paredes de la cámara. Las bobinas fabricadas tienen una respuesta lineal en frecuencia de 985 kHz. El plasma se monitorea en el eje poloidal dentro de la cámara de vacío, que es paralelo al plasma con la finalidad de caracterizar la descarga y estimar la resistividad del plasma. En la figura 5 se observa la implementación de los diagnósticos magnéticos.

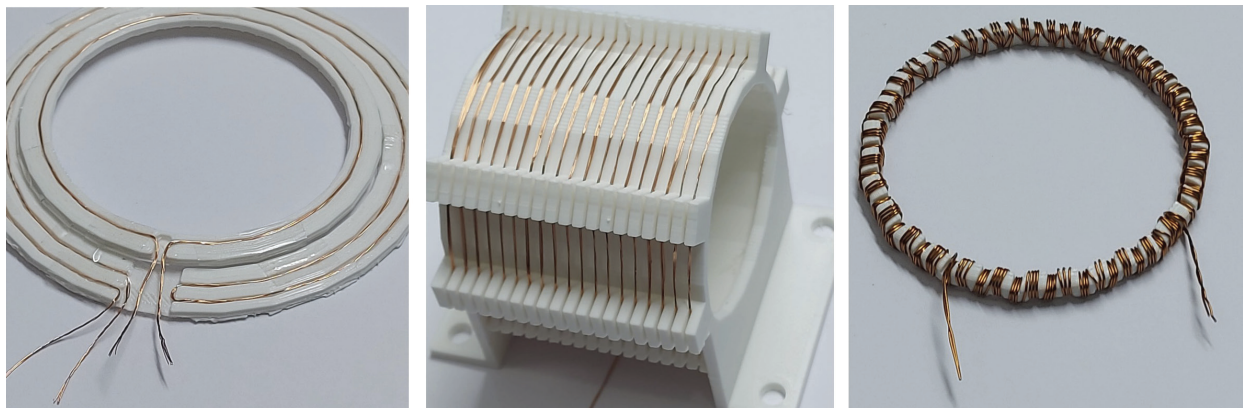


Figura 5. Prototipo de lazo diamagnético, bobina de Mirnow y bobina de Rogowski.

Conclusiones y/o recomendaciones (discusión)

Los resultados de la aplicación de DESCUR muestran una superficie cerrada de equilibrio muy similar a la que se obtuvo previamente con la utilización del código FIESTA. Se puede corroborar que se hizo una correcta configuración magnética de MEDUSA-CR con la *figura 2*, se ve claramente la delimitación dada por las bobinas de campo toroidal, este resultado se puede equiparar a los que se obtendría mapeando el campo dado por el bobinado, aunado al movimiento de las partículas sujeto a dicho campo, i.e. con DESCUR se logra una suerte de seguimiento de las líneas de campo. Los valores más altos de los límites beta pueden mejorar el factor de seguridad; y esto, a su vez, puede permitir que MEDUSA-CR trabaje con corrientes de plasma más altas utilizando la configuración en forma de frijol. Una posición variable en esta bobina de campo vertical es factible, aunque no se considera en la configuración original de nuestro Tokamak. Vale la pena analizar el caso, ya que sirve para optimizar la forma del plasma. Los esfuerzos que se realizaron para conseguir los códigos, instalarlos, compilarlos y ejecutarlos generaron experiencia y aprendizajes que requieren ser aplicados para realizar más estudios. Como se ha mencionado anteriormente, el próximo paso a seguir para continuar con el desarrollo de la plataforma computacional es comenzar a utilizar infraestructura computacional de alto rendimiento. Una plataforma de este tipo brindaría ventajas en cuanto a alto rendimiento, escalabilidad, estabilidad, alta disponibilidad y seguridad. Tanto el girotrón de 30 GHz como el magnetrón de 5,8 GHz que se utilizarán en MEDUSA-CR deben de ser de onda continua (CW) y no surgirán problemas de calentamiento debido a la corta duración de los disparos o descargas de plasma (1,0 ms a 3,0 ms).

De este proyecto se obtienen las siguientes conclusiones:

- Existen puntos espaciales donde el modo de propagación shear Alfvén entra en resonancia con el plasma del dispositivo MEDUSA-CR, a parte fue catalogada en general como slow Alfvén waves.
- No existen resonancias en el modo magneto-acústico del plasma de MEDUSA-CR, por lo que es posible afirmar la existencia de un modo de propagación denominado intermedio de las ondas electromagnéticas entre el modo fast magnetoacoustic y el modo slow magnetoacoustic.

- Es posible calentar al plasma mediante el modo ordinario de propagación de ondas electromagnéticas para el método ECRH en regiones cercanas al núcleo del plasma de MEDUSA-CR debido que no se identificó puntos radiales donde las ondas electromagnéticas se reflejen.
- El mejor desempeño de respuesta en frecuencia para lazo diamagnético se obtuvo utilizando cable de cobre con un diámetro de 1,2 mm en sección transversal con inductancia de hasta 24 μH y frecuencia de 10 kHz.

A continuación, se indican las sugerencias sobre aspectos del problema no tratado en el trabajo y sobre proyectos futuros que podrían desprenderse del mismo.

- Desarrollar el cálculo de la propagación de ondas electromagnéticas en el plasma para establecer ondas de Alfvén a partir de una geometría toroidal simétrica donde es posible obtener varios espectros, tanto continuos como discretos.
- Analizar las especificaciones, así como los detalles de posicionamiento del girotrón y simulaciones de radiación de potencia, frecuencia base, así como armónicos para el calentamiento del plasma de MEDUSA-CR a partir del ECRH.
- Es necesaria la implementación de bobinas de Mirnov a lo interno de la cámara de vacío con la finalidad de estudiar directamente el plasma sin las contribuciones de corrientes en las paredes de la cámara de vacío.

Agradecimientos

Se agradece a la VIE por la oportunidad y facilidades brindadas para promover la investigación en el campo de la fusión nuclear en el ámbito académico a nivel internacional.

Referencias

- [1] J. Ongena and G. Van Oost, "Energy for future centuries: Prospects for fusion power as a future energy source," *Fusion Sci. Technol.*, vol. 61, no. 2T, pp. 3–16, 2012.
- [2] C. Ribeiro, J. J. E. Herrera, and E. Chavez, "Bean-shaped spherical tokamak equilibrium with ergodic limiter," *IEEE Trans. Plasma Sci. IEEE Nucl. Plasma Sci. Soc.*, vol. 42, no. 3, pp. 585–589, 2014.
- [3] G. Vlad, F. Zonca, and S. Briguglio, "Dynamics of Alfvén waves in tokamaks," *Riv. Nuovo Cimento*, vol. 22, no. 7, pp. 1–97, 1999.
- [4] D. G. Swanson. Plasma waves. Institute of Physics Pub., 2003.
- [5] N. F. Cramer. The physics of Alfvén waves. Wiley-VCH, 1st ed edition, 2001. ISBN 3527402934;9783527402939.
- [6] A. Wootton. *Utexas.edu*. [Online]. Available: <https://web2.ph.utexas.edu/~iheds/magneticfieldsinatokamak.pdf>. [Accessed: 07-Mar-2022].
- [7] G.O. Ludwig, E. Del Bosco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, M.C.R. Andrade, C.S. Shibata, M. Ueda, L.F.W. Barbosa *Scielo.br*. [Online]. Available: <https://www.scielo.br/j/bjp/a/zrybR7hsvPf7SXXyx8Y7N6j/?format=pdf&lang=en>. [Accessed: 07-Mar-2022].

Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical

Atmospheric corrosion of low carbon steel, at different exposure angles, in a tropical environment

Ronald Jiménez-Salas¹, Ronald Brenes-Brenes², Javier Rodríguez-Yañez³, Jean Sanabria-Chinchilla⁴


Fecha de recepción: 23 de octubre, 2021

Fecha de aprobación: 6 de marzo, 2022


Jiménez-Salas, R., Brenes-Brenes, R., Rodríguez-Yañez, J., Sanabria-Chinchilla, J. Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 76-88.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5845>


1 Centro de Investigación en Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: rjimenez@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-2240-6840>


2 Centro de Investigación en Ingeniería de Materiales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: ronald.brenes@itcr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-0856-5298>

3 Laboratorio de Ecología Urbana, Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. Correo electrónico: jrodriguezy@uned.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0001-5539-3153>

4 Centro de Electroquímica y Energía Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: jean.sanabria@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-9597-7636>

Palabras clave

Corrosión atmosférica; acero al bajo carbono; ángulo de exposición; región tropical; ISO 9223.

Resumen

En esta investigación se estudió la afectación del ambiente sobre la corrosión del acero al bajo carbono, en una región tropical de la zona central de Costa Rica, con el objetivo de establecer la variación de la velocidad de corrosión en función del ángulo de exposición. Para tal fin se colocaron probetas a diferentes ángulos (0° , 30° , 45° , 60° y 90°), en tres estaciones a lo largo del Valle Central; asimismo se midieron los parámetros medioambientales como humedad, tiempo de humectación, temperatura y la presencia de contaminantes atmosféricos, como los sulfatos y los cloruros. Como principales resultados se determinó que el acero presentó un aumento lineal de la corrosión con la disminución del ángulo con respecto a la horizontal, así mismo la corrosión es uniforme en ángulos menores a 60° grados, presentando corrosión parcial en ángulos elevados, en especial para caras protegidas. La corrosividad se ubica en un nivel urbano leve tipo C2, según la normativa ISO.

Keywords

Atmospheric corrosion; exposure angle; low carbon steel; tropical region; ISO 9223.

Abstract

In this research, the effect of the environment in a tropical region of central Costa Rica on the corrosion of low carbon steel was studied, with the objective of establishing the variation of the corrosion rate as a function of the exposure angle. For this purpose, specimens were placed at different angles (0° , 30° , 45° , 60° and 90°) in three stations along the Central Valley; environmental parameters such as humidity, wetting time, temperature and the presence of atmospheric pollutants, such as sulfates and chlorides, were also measured. As main results it was determined that the steel presented a linear increase of corrosion with the decrease of the angle with respect to the horizontal, likewise the corrosion is uniform in angles less than 60° degrees, presenting partial corrosion in high angles, especially for protected faces. Corrosivity is at a mild urban level, type C2, according to ISO standards.

Introducción

La corrosión atmosférica es un fenómeno que se produce por efecto de la exposición de los materiales metálicos a las condiciones ambientales y que es una de las principales causas por las cuales se deterioran los metales y las aleaciones [1]; esta es responsable del detrimento de estructuras, equipos y componentes, y ocasiona anualmente muchas pérdidas económicas a empresas y gobiernos en todo el mundo, tanto por el reemplazo de elementos corroídos, como por el mantenimiento que es necesario aplicar para disminuir el efecto sobre ésta [2].

El grado de afectación de la corrosión atmosférica sobre un determinado tipo de material expuesto, depende de muchos factores que se pueden dividir en, los que corresponden propiamente al material, los relacionados con el entorno en el que está inmerso el material y la interacción que se da entre la superficie del material con el entorno. En el primer caso se considera el tipo de material, elementos de aleación, inclusiones no metálicas, tensiones mecánicas, productos de corrosión, etc. [3]; para el entorno influyen principalmente la humedad, temperatura, contaminantes ambientales, dirección de los vientos y finalmente, con respecto a la interacción, se consideran sobre todo el tiempo de humectación (TDH) y el ángulo de incidencia [4].

Con lo que respecta a los metales, los aceros al carbono son las aleaciones que más se ven afectados por la corrosión atmosférica, en particular los de bajo carbono, ya que son los tipos de aceros más utilizados en la fabricación de estructuras como edificios, puentes, entre otros [5]. Los aceros al bajo carbono presentan excelentes propiedades como su resistencia mecánica, conformabilidad, soldabilidad, sin embargo, una de sus debilidades radica en su resistencia media a la acción del medio ambiente, ya que se ve afectado por las condiciones ambientales como la humedad, la lluvia y agravadas cuando los electrolitos poseen contaminantes que aceleran esos procesos corrosivos [6].

Los contaminantes que mayoritariamente influyen el deterioro de los materiales por la corrosión atmosférica son los cloruros (Cl^-), cuyo origen se relaciona con la salinidad de los océanos [8], el dióxido de azufre (SO_2), que puede tener un origen diverso, como podría ser la contaminación por emanaciones de automóviles, actividades industriales o incluso por la emisión de gases durante las erupciones volcánicas [7]. En el caso de los cloruros, estos actúan principalmente de dos formas sobre la superficie del acero; en primer lugar, afecta la pasivación en la superficie del acero, al competir con el oxígeno en la formación de los productos de corrosión; pero también los cloruros, por su capacidad higroscópica, se disuelven en el agua superficial (humedad) y forman un agresivo medio de ataque sobre el acero, al mejorar la conductividad del electrolito [9].

El dióxido de azufre también influye de diferentes maneras la corrosión de un metal; primero actúa como un agente despolarizante catódico sobre la superficie metálica, lo que ocasiona una mayor corriente y por lo tanto una mayor velocidad de corrosión. Este contaminante también posee una excepcional solubilidad en el agua, y por poseer una mayor capacidad reductora que el oxígeno, ejerce sobre el acero un mayor efecto en la disolución del hierro, aun cuando esté presente en pequeñas cantidades [8,10]. Por otro lado, el SO_2 también puede reaccionar en la atmósfera, formando H_2SO_4 , que genera condiciones ácidas y, por lo tanto, mayor efecto corrosivo sobre el acero [11].

Con lo que respecta a los aspectos ambientales circundantes, la humedad relativa sobre la superficie, la lluvia (tanto en su frecuencia, como en su intensidad), el rocío nocturno y la niebla proporcionan el electrolito que favorece el proceso corrosivo, y cobra mucha importancia en países tropicales, donde los periodos lluviosos pueden abarcar más de 7 meses al año y la humedad relativa anual supera el 70 %, en una buena parte del año. Esto también, aunado a condiciones de temperatura ambiental, donde en muchas zonas se alcanzan temperaturas durante el día de hasta 30 °C, bajando en las noches a unos 15 °C a alturas cercanas a los 1000 m s.n.m [13].

El ángulo de inclinación de la superficie metálica es otro de los factores que también puede tener influencia en el grado de afectación por la corrosión atmosférica, algunas investigaciones [3,4,10] ya han establecido que al aumentar el ángulo al cual está expuesto el metal, se produce un decrecimiento de la velocidad de corrosión en los aceros al carbono, así misma influencia la zona de ubicación de las misma y también la velocidad de los vientos que inciden sobre su superficie. Estos estudios sobre todo se realizaron en atmósferas marinas, donde se concluye además, que existe mayor afectación con mayor cantidad de contaminantes, en particular por la exposición a alta concentración de cloruros [10].

El Valle Central, donde se realizó el estudio, se ubica en la región central de Costa Rica y alberga la mayor concentración poblacional e industrial del país [15,16]. Tiene una extensión de 3250 km² y una altura que va de los 800 hasta los 1500 m s.n.m., una temperatura que oscila entre 12°C y 35 °C, dependiendo de la época del año y la altura. El Valle Central esta circundado por montañas, volcanes y presenta un clima sobre todo de tipo monzónico [18].

En esta investigación se estudió la influencia del ángulo de exposición sobre la corrosividad de un acero al bajo carbono, en tres estaciones y el posible efecto sumidero de los contaminantes en una cuenca urbano-rural del Valle Central de Costa Rica.

Procedimiento experimental

Preparación del material

El material en estudio fue un acero al bajo carbono y cuya composición era 0,055 %C; 0,266 %Mn; 0,031 %Si; 0,007 %S y 0,011 %P, determinada mediante un espectrómetro de emisión óptica, marca Leco, modelo GDS 500A. Las placas de estudio eran de 1 mm de espesor y se cortaron a un tamaño de 10 cm x 15 cm. Luego se limpiaron, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM G-1, donde, en un primer momento se les aplicó limpieza mecánica con un cepillo rotatorio cerdas de acero, para la eliminación del óxido, y poderlas llevar hasta la condición de metal blanco. Después se lavaron cuidadosamente con agua y jabón y se introdujeron en acetona, para luego secarlas con aire caliente y finalmente se identificaron, pesaron y se colocaron en bolsas hasta poderlas ubicar en el sitio de exposición.

Condiciones de exposición atmosférica

La exposición de los especímenes se realizó en tres estaciones a lo largo del Valle Central, en la zona central de Costa Rica, como se puede observar en la figura 1. Una de las estaciones se ubicó en San Luis de Santo Domingo de Heredia (1) (estación San Luis); la otra en la Ciudad de la Investigación, en la Universidad de Costa Rica, en Sabanilla de Montes de Oca (2) (estación Sabanilla), y la última en el parque eólico, en los cerros de Escazú (3) (estación Eólicas), en la zona suroeste del Valle Central.

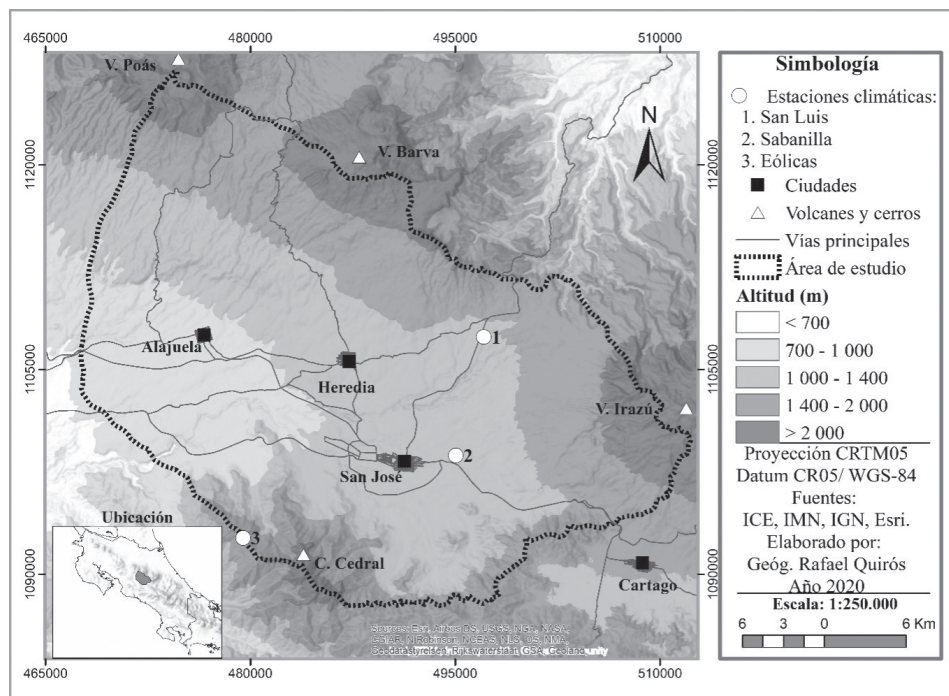


Figura 1. Ubicación de las estaciones de exposición de especímenes

En el cuadro 1 se presentan la ubicación más precisa de las estaciones, así como la altura y tipo de zona.

Cuadro 1. Características de estaciones de exposición atmosférica

Estación	Ubicación geográfica		Altura (m s.n.m.)	zona
	Latitud Oeste	Longitud Norte		
San Luis	84°01'53"	10°00'33"	1345	Rural
Sabanilla	84°02'49"	9°55'59"	1205	Urbana
Eólicas	84°11'14"	9°52'54"	1772	Rural

En los sitios de exposición, las placas se fijaron en bastidores de acero utilizando roldanas de acrílico, para garantizar un aislamiento eléctrico de éstas con respecto a la estructura metálica. Los bastidores se giraron y fijaron de tal manera que las placas quedaran expuestas a ángulos de 0°, 30°, 45°, 60° y 90°, con respecto a la horizontal. En la colocación de las placas también se consideró la afectación del viento, por lo que la orientación de éstas fue de frente a la dirección de los vientos. Para cada ángulo se dispusieron 4 probetas, 3 para determinar la afectación de la corrosión por medio del análisis de pérdida de peso y la otra fue utilizada para el análisis de composición de los óxidos por medio de difracción de rayos X.

Determinación de contaminantes ambientales

Con lo que respecta a la determinación de los contaminantes ambientales se siguió la norma ISO 9225:2012 [22], mediante la colocación de velas de plomo para determinación de SO₂ y velas húmedas para la determinación de los cloruros. Estas se ubicaron en casetillas a menos de 5 m de donde se expusieron las placas. La colocación y la extracción se realizó mensualmente durante el periodo de estudio. También se ubicaron medidores pasivos de contaminantes para corroborar las informaciones de los contaminantes. La clasificación de la corrosividad de las atmósferas se realizó según los criterios de la norma ISO 9223:2012[19].

Datos medioambientales

Los datos medioambientales tales como: temperatura promedio, precipitaciones, porcentaje de humedad relativa y vientos, se obtuvieron de estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de estudio y pertenecientes del Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica; en dos de las estaciones la distancia era menor a 200m, con excepción de las Eólicas donde se ubican a una distancia de aproximadamente 2 km.

Procesamiento de probetas corroídas

Las probetas se recolectaron después de 12 meses de exposición y se colocaron en bolsas plásticas para el procesamiento. Para la estimación de la velocidad de corrosión se siguió la norma ISO 9226:2012 [23]. Para los análisis difractométricos, se cortaron cuidadosamente las placas mediante cizallado. En el análisis de los productos de corrosión por XRD se usó un difractómetro de rayos X PANalytical EMPYREA.

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos después de un año de exposición de las probetas al medio ambiente.

Datos ambientales

Costa Rica es un país tropical donde las estaciones se pueden dividir en época lluviosa y época seca. La época lluviosa abarca de mayo a noviembre y la época seca de diciembre a abril aproximadamente, ya que en algunos años esos periodos se ven afectados por los denominados fenómenos de El Niño y La Niña, que incrementan o reducen esos periodos [20].

Como se observa en la figura 2, donde se muestran los promedios de las precipitaciones en las estaciones durante el año de estudio, en setiembre se presentó una alta precipitación, principalmente en la estación Eólicas, donde el promedio estuvo cercano de 500 mm*m⁻² y en una menor medida, en las estaciones San Luis y Sabanilla, donde se precipito un promedio entre 250 y 300 mm*m⁻². Luego, hay un descenso durante la época seca, hasta llegar prácticamente a cero en enero. En mayo, que corresponde a la época donde normalmente se consolida la época lluviosa, se produce un pico de precipitaciones, sobre todo en la zona de las eólicas, para luego seguir con una menor cantidad en los demás meses. El promedio anual de lluvia es mayor en la región de las eólicas y menor en la estación San Luis, donde las precipitaciones solo alcanzan el 53 % de las precipitaciones que se produjeron en las eólicas. Para el caso de estación Sabanilla, las precipitaciones casi corresponde a un valor promedio entre las estaciones de Eólicas y San Luis, como se observa en el cuadro 2.

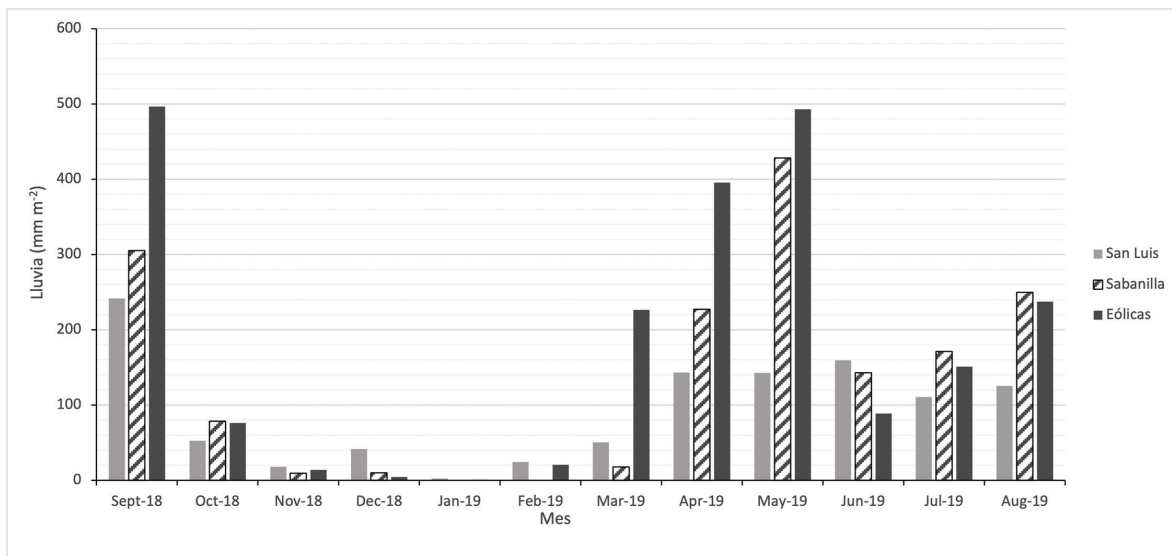


Figura 2. Promedio de precipitaciones mensuales en estaciones de estudio.

Cuadro 2. Resumen de datos medioambientales para las estaciones

Parámetro / Estación	Eólica	Sabanilla	San Luis
T m (°C)	19 °C (16 °C-23 °C)	22 °C (17 °C-27 °C)	21 °C (16 °C-26 °C)
HR (%)	83	80	90
Lluvia acumulada (mm m ⁻² año ⁻¹)	2122	1641	1134
Velocidad del viento promedio (m s ⁻¹)	3,10	2,04	3,00

Con respecto a la temperatura promedio, los valores son muy similares en las tres estaciones durante el año; aspecto que está más determinado por la altura en que se ubican éstas y no tanto por los cambios estacionales, como si ocurre en regiones más alejadas del Ecuador en el hemisferio norte y sur. Así también se produce una variación de la temperatura que fluctúa entre el día y la noche, con promedios de día de hasta 26 °C y en la noche descendiendo hasta valores de 16 °C.

El porcentaje de humedad relativa es bastante alta en las tres zonas, alcanzando valores de 80 % o más, factor de mucha importancia en la corrosión de los aceros y otros metales, al actuar como electrolito en el proceso electroquímico, lo cual ha sido determinado en los estudios que se han hechos en varias regiones del planeta [24,25], sobre todo cuando se combina con contaminantes ambientales como los sulfatos y los cloruros.

Con lo referente al tiempo de humectación (TDH), los valores obtenidos se muestran en la figura 3. Estos valores se ubican en una categoría τ_5 ($TDH > 5500$ h/a) para la estación de San Luis, con excepción de los meses de enero y febrero, donde descienden a τ_4 ($2500 > TDH < 5500$), según la clasificación de ISO 9223:2012. Para el caso de Sabanilla, la mayoría de los meses en la época lluviosa alcanza valores de τ_5 , pero de noviembre a abril desciende a τ_4 , que es concordante aproximadamente con la época seca. En el caso de las eólicas, su comportamiento es similar al de Sabanilla, pero presenta picos más altos de TDH en algunos meses del año. Con estos valores altos de tiempo de humectación, donde los promedios anuales son 5916h/a, 4992h/a y 5856h/a para las estaciones de San Luis, Sabanilla y Eólicas respectivamente, la corrosión se ve favorecida dada la alta exposición a electrolito durante todo el año, como se mencionó anteriormente con respecto a la humedad relativa; esta es una condición que se presenta y caracteriza a muchas zonas tropicales ecuatoriales.

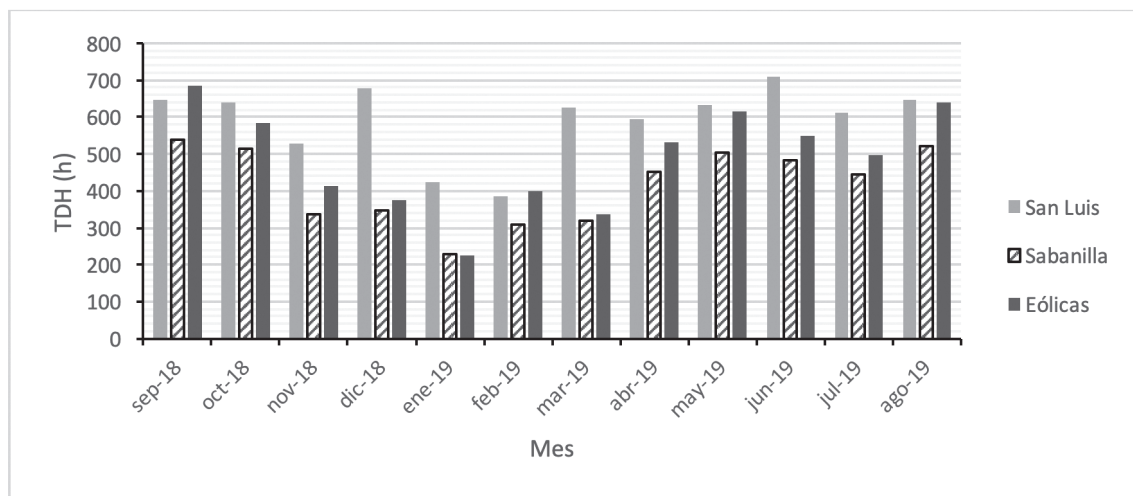


Figura 3. Tiempo de humectación mensual (TDH) en las diferentes estaciones.

Contaminantes atmosféricos

La presencia de dióxido de azufre en la atmósfera se muestra en la figura 4. Como se observa, existe bastante variación entre los diferentes meses de estudio, donde en meses como noviembre se alcanzan valores arriba de $20 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, pero en enero bajan a menos de $5 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, lo que representa una disminución de más de 80%, sin embargo promediando

los valores obtenidos, se tiene una concentración anual de $10,4 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para la estación San Luis, $8,3 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para Sabanilla y $9,1 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para la estación Eólicas, lo que las ubicaría como nivel P_1 , correspondiente con una atmósfera urbana en los tres casos, según las normas ISO 9223:2012. Con estos resultados se puede anotar que la zona de San Luis presenta la mayor contaminación por dióxido de azufre, aspecto que podría ser contradictorio con lo esperado, ya que esta estación se ubica en una zona agrícola rural, donde se esperaría una menor contaminación por efecto de las emisiones de automóviles, sin embargo, al analizar con más detalle la figura 4, se observan algunos picos de concentración, que concuerdan con erupciones volcánicas de cenizas y gas originadas por el Volcán Turrialba en los periodos de tiempo en que se realizó la investigación, donde dicho volcán estuvo muy activo. Por la variación en la dirección de los vientos se podría hipotetizar que estas emisiones también pudieron afectar las otras estaciones, ya que éstas también ofrecen variaciones importantes entre los diferentes meses.

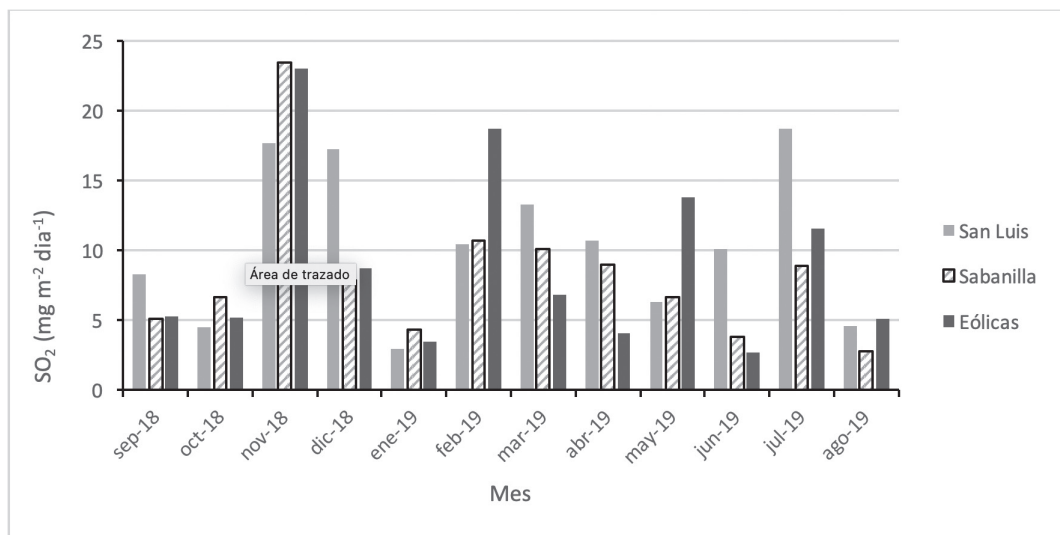


Figura 4. Determinación mensual de bióxido de azufre en las diferentes estaciones.

En la figura 5 se muestra la variación mensual de los cloruros. Al igual que para los sulfatos, existe bastante variación entre los meses. Los valores promedio anuales muestran una concentración de $3,52 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para la estación San Luis, $3,82 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para Sabanilla y $4,00 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para la estación eólica, lo que las ubicaría como nivel S_1 , pero estos valores están muy cercanas al límite inferior, ya que este nivel el rango de la norma ISO 9223:2012 esta entre $3 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ y $\text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, lo que podría asociarse con un nivel bajo de cloruros.

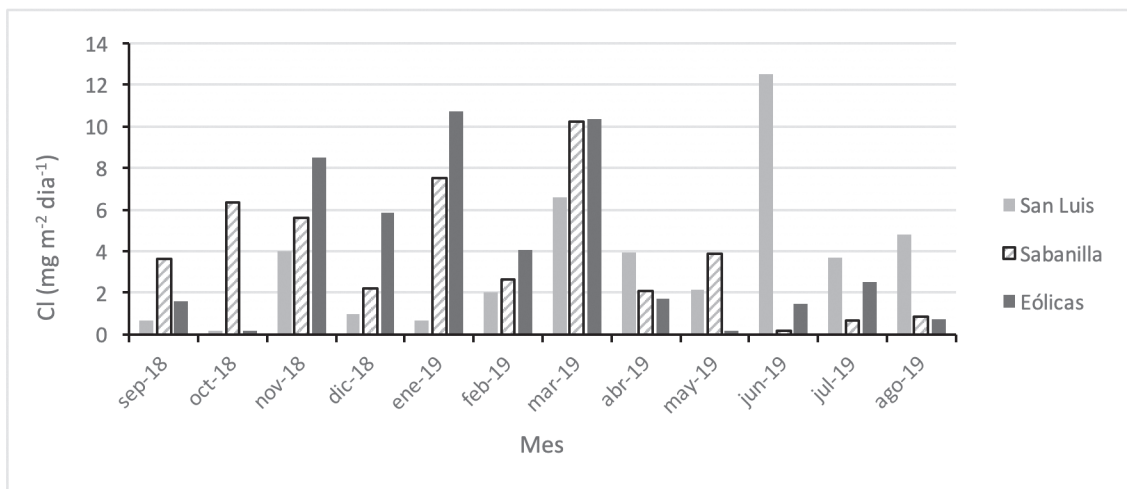


Figura 5. Determinación de Cloruros en las diferentes estaciones mensualmente.

Velocidades de corrosión del acero

Las velocidades de corrosión en función de los ángulos de exposición se muestran en la figura 6. Para todos los casos, la corrosividad se ubica en un nivel bajo, que correspondería a una categoría C2, según la norma ISO 9223:2012.

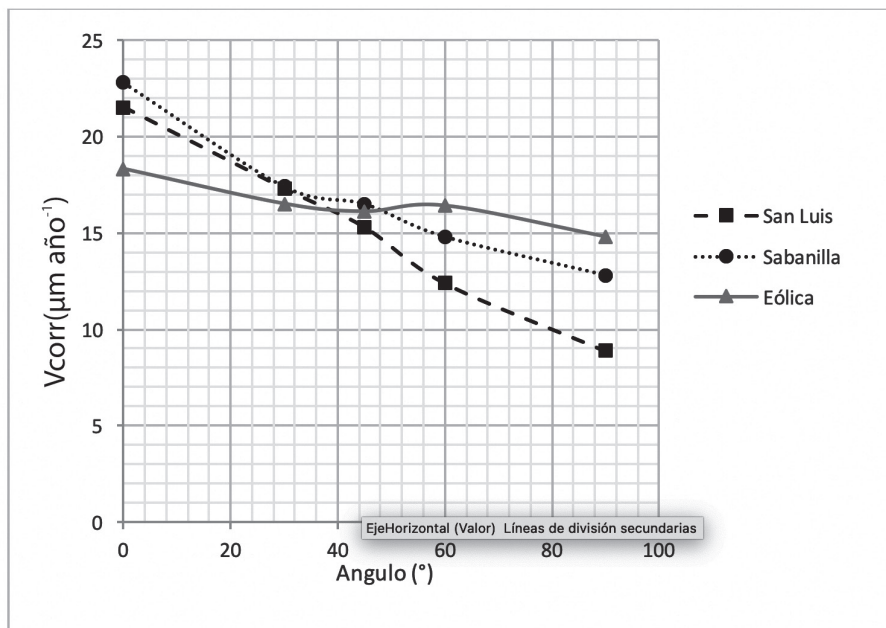


Figura 6. Velocidad de corrosión del acero para diferentes ángulos de exposición en las estaciones de estudio.

Para los diferentes ángulos hay una pequeña variación entre los valores obtenidos para las diferentes estaciones, siendo mayor para los ángulos mayores (90°) y menores (0°) y más cercanos entre sí, para los ángulos que comúnmente se usan para evaluar la corrosión atmosférica, como son los ángulos de 45° y 30° . Los valores promedio para cada ángulo de las tres estaciones fueron de 21, 17, 16, 15, 12 $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ para los ángulos de 0° , 30° , 45° , 60° y 90° respectivamente.

Productos de corrosión

Los análisis difractométricos realizados a los productos de corrosión a diferentes ángulos, mostraron la presencia de dos compuestos, como son la lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$), como componente en mayor proporción (65 %) y la geothita ($\alpha\text{-FeOOH}$) (35 %). Estas sustancias fueron muy similares para los diferentes ángulos y estaciones.

Discusión de resultados

La corrosión producida sobre el acero, en las tres estaciones de estudio, se ubica en el rango de corrosión bajo (C2) para todos los casos, a pesar de que de tiempos de humectación indican valores medios y altos ($\tau_4\text{-}\tau_5$); sin embargo, la presencia de contaminantes es baja, ya que los promedios obtenidos se ubican en un nivel P_1 para sulfatos y S_1 para cloruros. Este nivel de clasificación de atmósferas sería concordante con una de tipo urbano [21], que coincide con una de las zonas donde se ubica una de las estaciones, como lo es la estación de Sabanilla, no tanto así para las estaciones de San Luis y Eólicas, que están en una zona rural.

Aunque los promedios anuales de sulfatos son bajos, en algunos meses se presentaron valores altos de hasta $24 \text{ mg m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, aspecto que se atribuye a las erupciones de gases y ceniza del volcán Turrialba, que durante el año de estudio mostro mucha actividad, y por la intensidad de las erupciones y la variación en la dirección de los vientos, afecto diversas zonas del valle central, como se ver en figura 7, donde se muestra la zonas afectadas por erupciones entre el 2010-2017, y aunque corresponde a un periodo anterior, durante el 2018 siguieron ocurriendo erupciones de importante magnitud [28].

En caso de los cloruros, la presencia de éstos se atribuye a la relativa cercanía de la Costa Atlántica y Pacífica; para el caso de la costa atlántica los cloruros pueden ser transportados por los vientos que atraviesan los pasos ubicados entre montañas, principalmente el paso de la Palma, y que circulan en el Valle Central normalmente en dirección noroeste. Para el caso de la costa pacífica, también estos pueden ingresar al valle por las direcciones variantes de los vientos que se presentan entre el día y la noche [26]. Estos vientos son muy variables en intensidad y en dirección, por lo que pudieron ser los responsables de los picos que dan en algunos meses, ya que como se observa en la figura 5, no se mantienen constantes en el tiempo [27].

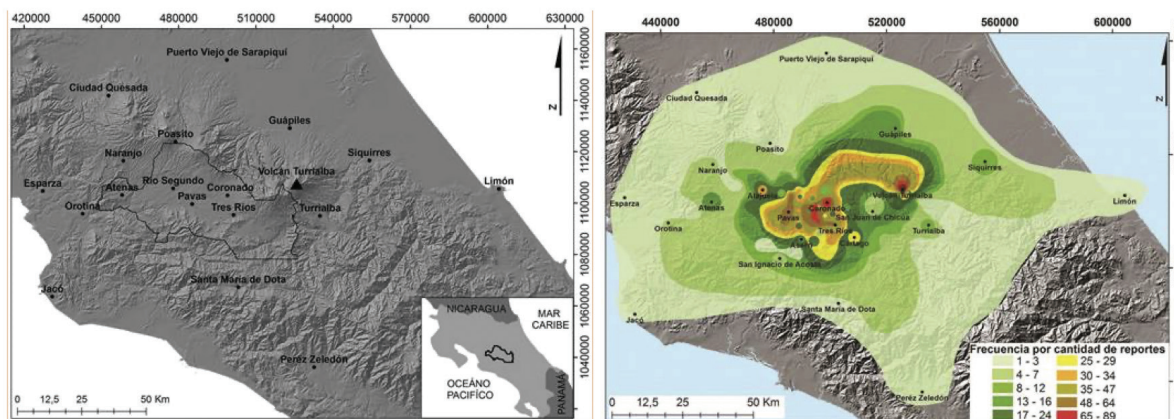


Figura 7. Erupción del volcán Turrialba, zonas de afectación e isofrecuencias por caída de cenizas entre el 2010-2017 [28].

Al analizar las variaciones de la velocidad de corrosión con respecto a los ángulos de exposición, en todos los casos se observa una menor corrosividad a medida que se aumenta el ángulo de exposición. Este es un comportamiento que se ha visto en otros estudios y que se atribuye a una mayor acumulación de humedad y contaminantes [4,14] en los ángulos más bajos, ya que por la posición los contaminantes permanecen más tiempo en contacto con la superficie metálica y resulta más difícil su remoción por efecto de las lluvias, que si se produce a ángulos más horizontales.

La estación que presentan mayor variación entre los valores de corrosión con respecto a los ángulos es la de San Luis, ya que la velocidad de corrosión en la superficie expuesta a 90°, con respecto a la colocada a 0°, disminuye en aproximadamente en un 60 %. Para el caso de Sabanilla y eólicas, las variaciones son de entre 45 % y 20 %, respectivamente. Otro aspecto importante de anotar es que la variación de velocidad de corrosión, que se presenta en las placas colocadas a 30° con respecto a las colocadas a 45°, son variaciones relativamente pequeñas (dentro de los rangos de incertidumbre de las tres placas analizadas que ronda el 5% para el proceso de decapado) y que tiene su importancia, ya que estos ángulos son los mayormente usados para los estudios estandarizados de la velocidad de corrosión atmosférica. Otro aspecto por resaltar es que la inspección visual de las placas indica una corrosión generalizada en la cara expuesta a la dirección de los vientos, pero la cara opuesta muestra grados de afectación distintos a mayores ángulos, donde la corrosión solo afecto una cierta proporción de la placa. Con respecto a los óxidos formados, los óxidos obtenidos son la lepidocrosita y la goethita. Estas dos especies son consecuentes con los resultados que se han obtenido en otras investigaciones [12,17], y que son las formas químicas, de los productos de corrosión de los aceros al bajo carbono, prevalecientes en atmósferas rurales y urbanas después de un año de exposición.

Conclusiones

La corrosividad en los lugares de muestreo corresponde a una atmósfera urbana leve, de tipo C2, a lo largo de todo el Valle Central, ya que en las tres estaciones se obtuvo un comportamiento muy similar.

Los niveles de contaminación son bajos, pero con variabilidad asociada tanto con las erupciones volcánicas, en el caso de dióxido de azufre, como a los vientos para el cloruro. Debido a esto se considera que el factor controlante parece ser el tiempo de humectación, el cual es elevado (usualmente τ_5).

En esta investigación se ha corroborado que la exposición del acero a la atmósfera, a diferentes ángulos de exposición genera variaciones en las velocidades de corrosión, siendo mayor en las posiciones más horizontales y disminuyendo hasta la posición vertical, esto debido principalmente a la mayor permanencia del electrolito y de los contaminantes atmosféricos sobre la superficie metálica.

Se determinó que no existe una variación significativa de la corrosión entre sitios en los rangos usuales de evaluación de la corrosión atmosférica a 30° y 45°, así como que la corrosión es uniforme en ángulos menores a 60°, presentando corrosión parcial en ángulos elevados, en especial para caras protegidas (lado mirando al suelo).

Finalmente, se puede establecer que la colocación de materiales con ángulo más horizontales traería consigo un mayor impacto corrosivo, aunque esto no necesariamente coincide con las necesidades de diseño, pero si es un aspecto importante para tomar en cuenta con respecto a las necesidades de sistemas de protección en componentes y estructuras fabricadas de acero al bajo carbono.

Agradecimientos

Se agradece especialmente al Instituto Nacional de Meteorología y al Instituto Costarricense de Electricidad por facilitar los datos meteorológicos del Valle Central Occidental. Los datos reales de corrosión se obtuvieron de los sitios de medición ubicados en las instalaciones de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz y del Ministerio de Seguridad. Este estudio fue financiado por el Consejo Nacional de Presidentes de Universidades (CONARE) de Costa Rica, como parte de un proyecto de colaboración entre la Universidad Estatal a Distancia (UNED-VINVES-6-10-50), la Universidad de Costa (UCR-VI-805-B8-650), el Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT-VI-269-2017), la Universidad Nacional (UNA- SIA: 0600-17) y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-VIE 1490-021)

Referencias

- [1] NACE International Impact. International measures of prevention, application and economic of corrosion technology study. Houston, TX, USA: NACE International, 2016. Available from: <http://impact.nace.org/executive-summary.aspx> [Accesed 15th december 2019]
- [2] Hansson, C.M."The Impact of corrosion on Society". In *Metallurgical and Materials Transactions A*. Volumen 42A, October, 2011.
- [3] Morcillo M., Chico B., Díaz I., Cano H., de la Fuente D. "Atmospheric Corrosion Data of Weathering Steels. A Review". *Corrosion Science*. Volume 77, 2013, pp 6-24
- [4] Vera, R., Rosales, B., Tapia, C. "Effect of the exposure angle in the corrosion rate of plain carbon steel in a marine atmosphere. *Corrosion Science*, 45, 2003, pp 321–337.
- [5] Murkute Pratik, Kumar Ravi, Choudhary S., Maharana H.S., Ramkumar J., Mondal K. "Comparative Atmospheric Corrosion Behavior of a Mild Steel and an Interstitial Free Steel". In *Journal of Materials Engineering and Performance*. Volume 27(9), 4497. 2018.
- [6] Alcántara Jenifer, de la Fuente Daniel, Chico Belén, Simancas Joaquín, Díaz Iván, Morcillo Manuel. "Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel. A Review". In *Materials*. MDPI, Publisher of Open Access. 2017.
- [7] J. Tidblad, V. Kucera, F. Samie, S. N. Das, C. Bhamornsut, L. C. Peng, K. L. So, Z. Dawei, L. T. H. Lien, H. Schollenberger, C. V. Lungu and D. Simbi, ""Exposure Programme on Atmospheric Corrosion Effects of Acidifying Pollutants in Tropical and Subtropical Climates". In *Water Air Soil Pollut-focus*. 2007, pp 241-247.
- [8] Wenjuan Chen, Long Hao, Junhua Dong, Wei Ke. "Effect of Sulphur dioxide on the corrosion of a low alloy Steel in simulated coastal industrial atmosphere".in *Corrosion Science*, 83, 2014. pp 155-163.
- [9] Zhao-liang Li, Kui Xiao, Chao-fang Dong, Xue-qun Cheng, Wei Xue, Wei Yu. "Atmospheric corrosion behavior of low-alloy steels in a tropical marina environment" in *J. Iron Steel Res. Int.* 26, 2019, pp 1315–1328.

- [10] Groysman A.) "Corrosion in Natural and Industrial Environments" In: *Corrosion for Everybody*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3477-9_3. 2010
- [11] Xinran Li, Xiutong Wang, Liyuan Wang, Yuanyuan Sun, Binbin Zhang, Hongling Li, Yanliang Huang, and Baorong Hou. "Corrosion Behavior of Q235 Steel in Atmospheres Containing SO₂ and NaCl". In *Journal of Materials Engineering and Performance*. 28. 2019
- [12] Qing-he Zhao, Wei Liu, Jian-wei Yang, Yi-chun Zhu, Bin-li Zhang, and Min-xu Lu. "Corrosion behavior of low alloy steels in a wet-dry acid humid environment", In *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 23, Number 9, 2016.
- [13] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica Segunda Comunicación sobre Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. San José, Costa Rica: MINAET, IMN, PNUD, CRRH. 2008 Available from: http://users.clas.ufl.edu/prwaylen/geo3280articles/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf [Accesed 22 december 2020]
- [14] Santana Juan J., Cano Víctor, Vasconcelos Helena C., Souto Ricardo M. "The Influence of Test-Panel Orientation and Exposure Angle on the Corrosion Rate of Carbon Steel". In *Mathematical Modelling. Metals*. 10, 2020.
- [15] PRUGAM. Planificación Regional Urbana del Gran Área Metropolitana, San José, Costa Rica, Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos, 2009. Available from Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos: <http://www.mivah.go.cr/PRUGAM.shtml> [Accesed 23th december 2019]
- [16] INEC. Anuario Estadístico 2010. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Estadística y Censos, Ministerio de Hacienda, 2011. Available from: https://www.inec.cr/sites/default/files/documentos/anuario_estadistico_publicaciones/reanuarioestad2010-02.pdf [Accesed 20th november 2019]
- [17] Chen Pan, Wei Han, Zhenyao Wang, Chuan Wang, and Guocai Yu. "Evolution of initial Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in an Industrial Atmosphere", in *ASM International*. Vol 25(12). 2016.
- [18] Solano, J., & Villalobos, R. Regiones y Subregiones Climáticas de Costa Rica. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional, 2000. Available from: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica#:~:text=Esta%20misma%20disposici%C3%B3n%20monta%C3%B1osa%2C%20junto,cual%20pertenece%20la%20Regi%C3%B3n%20Valle> [Accesed 12th june 2019]
- [19] Corrosion of metal and alloys, Classification of corrosivity of atmospheres, ISO DIS 9223, ISO, Geneva. 2012.
- [20] National Oceanographic and Atmospheric Administration, National Hurricane Center and Central Pacific Hurricane Center. Available from: <https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2019&basin=atl> [Accesed 14th may 2021]
- [21] Corrosion of metal and alloys, Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres, ISO DIS 9224, ISO, Geneva. 2012.
- [22] Corrosion of metal and alloys, Corrosivity of atmospheres, methods of measurement of pollution ISO DIS 9225, ISO, Geneva. 2012,
- [23] Corrosion of metal and alloys, Corrosivity of atmospheres, Determination of corrosion rates of standard specimens for the evaluation of corrosivity, ISO DIS 9226, ISO, Geneva, 2012,
- [24] Morcillo M. "Fundamental and research frontier of atmospheric corrosion". Madrid, Spain: Materials, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-03842-642-4>.
- [25] Wei Han, Chen Pan, Zhenyao Wang and Guocai Yu Initial. "Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in Industrial Environment". In *Journal of Materials Engineering and Performance*. Volume 24(2), 2015.
- [26] Xiao Kui, Dong Chao-fang, Li Xiao-gang, Wang Fu-ming. "Corrosion Products and Formation Mechanism During Initial Stage of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel". In *Journal of Iron and Steel Research International*. 15(5), 2008. pp42-48.
- [27] Muñoz AC, Fernández W, Gutiérrez JA, & Zárata, E. 2002. "Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia". *Tópicos meteorológicos y oceanográficos* 9 (1): 1-13.
- [28] Campos D, Alvarado G.(2018) "Análisis de la distribución espaciotemporal de la caída de cenizas del volcán turrialba (2010 - 2018), costa rica: isofrecuencia, volumen y afectación" *Rev. Geol. Amér. Central* n.59 San Pedro de Montes de Oca Jul./Dec.

Efecto de zonas agroecológicas y condición de siembra sobre altura de planta y rendimiento en avena forrajera en la región Puno, Perú




Effect of agroecological zones and planting condition on plant height and yield in forage oats in the Puno region, Perú

Julio Cesar Zeballos-Cabana¹, William Leoncio Carrasco-Chilon², Héctor Vladimir Vásquez-Pérez³

Fecha de recepción: 16 de noviembre, 2021
Fecha de aprobación: 13 de marzo, 2022

Zeballos-Cabana, J.C., Carrasco-Chilon, W.L., Vásquez-Pérez, H.V. Efecto de zonas agroecológicas y condición de siembra sobre altura de planta y rendimiento en avena forrajera en la región Puno, Perú. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 89-96.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5992>

- 1 Programa Nacional de Investigación Pastos y Forrajes, Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. Perú. Correo electrónico: jzeballos@inia.gob.pe
 <https://orcid.org/0000-0002-8812-6024>
- 2 Estación Experimental Agraria Baños del Inca-Cajamarca, Instituto Nacional de Innovación Agraria. Perú. Correo electrónico: wcarrasco@inia.gob.pe
 <https://orcid.org/0000-0003-4930-6548>
- 3 Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario, Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA. Perú. Correo electrónico: hvasquez@inia.gob.pe
 <https://orcid.org/0000-0003-4657-1397>

Palabras clave

Agroclimatología; *Avena sativa*; dormideros; forrajes; terreno de rompe.

Resumen

El presente estudio de *Avena sativa* variedad dorada cayuse, se realizó en seis comunidades de puna seca (PS) y seis comunidades de puna húmeda (PH) en la región Puno. Los objetivos fueron evaluar la influencia de dos zonas agroecológicas PS y PH, dos condiciones de siembra en dormideros (D) y terreno de rompe (TR), sobre la altura de planta (cm) y rendimiento (kg/MS/ha), además de determinar la mejor combinación. Para estimar la altura de planta se utilizó una regla métrica y para el rendimiento se utilizó el método del cuadrante, se usó el DECA con dos factores, el análisis de datos se realizó en el programa estadístico SAS versión 9.4. Según el análisis de varianza y prueba de Tukey, para efectos principales por zona agroecológica la altura de planta en PH y PS fue de 41 y 21 cm de longitud respectivamente ($p > 0.05$), en rendimiento se obtuvo 6551 y 1623 kg/MS/ha ($p < 0.05$); según la condición de siembra la altura de planta en D y TR fue de 39 y 23 cm respectivamente ($p > 0.05$), en rendimiento se obtuvo 5394 y 2779 kg/MS/ha ($p > 0.05$); para efectos simples en combinaciones, PH*D, PH*TR, PS*D y PS*TR, la altura de planta fue de 50, 31, 28 y 14 cm de longitud respectivamente ($p > 0.05$), en rendimiento se obtuvo 8917, 4185, 1872 y 1374 kg/MS/ha respectivamente ($p < 0.05$). Se concluye que la zona agroecológica tiene influencia significativa sobre el rendimiento y la mejor combinación significativa para rendimiento es PH*D.

Keywords

Agroclimatology; *Avena sativa*; roosts; forages; breaking ground.

Abstract

The present study of *A. sativa* golden variety cayuse, was carried out in six communities of dry puna (PS) and six communities of wet puna (PH) in the Puno region. The objectives were to evaluate the influence of two agroecological zones PS and PH, two planting conditions in roosts (D) and breaking ground (TR), on the plant height (cm) and yield (kg/MS/ha) in addition to determine the best combination. A metric ruler was used to estimate the plant height and the quadrant method was used for the yield, the DECA with two factors was used, the data analysis was performed in the SAS statistical program version 9.4. According to the analysis of variance and Tukey's test, for the main effects by agroecological zone, the plant height in PH and PS was 41 and 21 cm in length respectively ($p > 0.05$), in yield 6551 and 1623 were obtained kg/MS/ha ($p < 0.05$); according to the sowing condition, the plant height in D and TR was 39 and 23 cm respectively ($p > 0.05$), in yield it was obtained 5394 and 2779 kg/MS/ha ($p > 0.05$); for simple effects in combinations, PHD, PHTR, PSD and PSTR, the plant height was 50, 31, 28 and 14 cm in length respectively ($p > 0.05$), in yield 8917, 4185, 1872 and 1374 were obtained kg/MS/ha respectively ($p < 0.05$). It is concluded that the agroecological zone has a significant influence on yield and the best significant combination for yield is PH*D.

Introducción

A nivel mundial la mayor cantidad de alpacas se encuentra en el Perú con una población nacional de 3685516, en la sierra y por ende en la zona alto andina se concentra la mayor cantidad con 76%: distribuidas en las regiones de Puno (40%), Cusco (15%), Arequipa (13%),

Huancavelica (8%) y otras regiones (23.98%) respectivamente, donde se requiere introducir el cultivo de avena forrajera, para mitigar la escasez de alimento destinado a las alpacas en época de estiaje [1].

Un punto de referencia de la zona agroecológica puna húmeda es la empresa de ganadería Rural Alianza donde las temperaturas varían entre -12 a 18 °C la precipitación pluvial es 932 mm/año, en cuanto a zona agroecológica puna seca es el Centro de Investigación y Producción Quimsachata del INIA, donde las temperaturas oscilan entre 3 a 15 °C con una precipitación pluvial de 597 mm/año, es decir el contraste de estas dos zonas agroecológicas está determinado por la precipitación anual, según refiere Mamani [2].

Entre las gramíneas la Avena (*Avena sativa* L), es de periodo vegetativo anual, es importante entre los forrajes para la sierra, ya que se adapta a condiciones ambientales, altitudes, tipo de terreno y manejo diverso, su uso es como ensilado, heno y forraje verde, en la época seca para la alimentación de ganado [3].

La avena forrajera ha estado siempre presente en los ecosistemas altoandinos, se cultiva mayormente en valles interandinos, pero también en partes altas en este caso en microclimas especiales, generalmente en dormideros (corrales) cerca de la vivienda del criador de alpacas, la siembra inicia en el mes de noviembre prolongándose según zona hasta diciembre coincidiendo con el inicio de época de lluvias, la cosecha se realiza en el mes de abril, luego se henifica para utilizar como suplemento en la época de estiaje donde incrementa la escasez de alimento en la zona altoandina [4].

Para obtener forraje de avena en la zona alto andina, se debe considerar como condición la siembra en dormideros con acumulación de estiércol; esto con la finalidad de incrementar el rendimiento, proteger al cultivo de vientos fuertes y atenuar las heladas, además de resguardar del consumo animal, hasta inicios de floración [5].

La avena puede cultivarse en terrenos de barbecho o en terrenos de “rompe” de pastos naturales como cultivo explorador; además, puede sembrarse en diferentes tipos de suelo, pero donde se obtiene mayor producción es en suelos de textura franco arcilloso, con pH de 5.0 a 7.5 sin inconvenientes de salinidad [6].

Bajo este contexto, el objetivo general fue evaluar el efecto de zonas agroecológicas y condición de siembra sobre altura de planta y rendimiento en avena forrajera (*Avena sativa* L) en la región Puno. Los objetivos específicos fueron evaluar la influencia de dos zonas agroecológicas puna húmeda y puna seca, dos condiciones de siembra en dormideros (con acumulación de estiércol) y terreno de rompe (primer roturado de suelo) sobre la altura de planta (m) y rendimiento de biomasa aérea (kg/MS/ha) además de determinar la mejor combinación, para ello se utilizó *Avena sativa* variedad dorada cayuse.

Materiales y métodos

El presente estudio se realizó en seis comunidades de puna seca (Caritamaya, Coarita, Rosario Alto Ancomarca, San José de Alto Ancomarca, Tincopalca y Tupala) y seis comunidades de puna húmeda (Cayatocco, Cayconi, Ccatacancha, Crucero, Jorge Chávez y Oruro) de la región Puno (Figura N° 1), comunidades alpaqueras asentadas sobre los 4000 m, durante el mes de abril del 2018, para lo cual se utilizó un área de 1600 m², 19.2 kg de semilla de avena forrajera variedad dorada cayuse por cada localidad, a una densidad de siembra de 120 kg/ha.

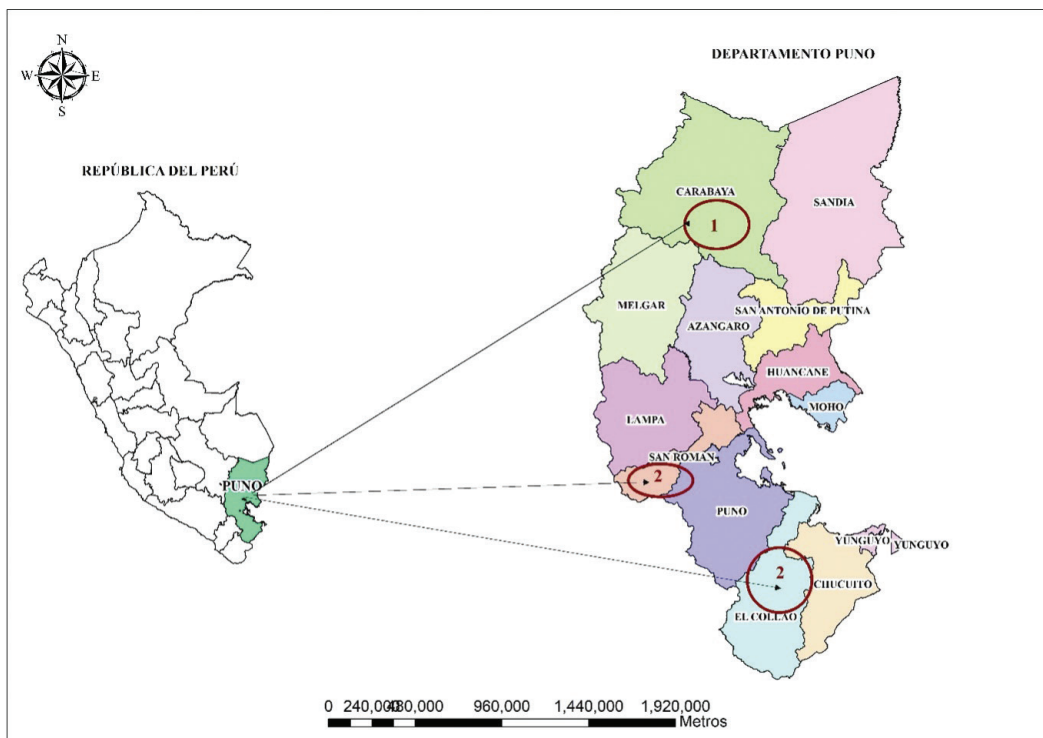


Figura 1. Ubicación política de las comunidades campesinas en la región Puno. 1. Puna húmeda 2. Puna seca.

Para estimar la altura de planta se utilizó una regla métrica, realizando 11 lecturas por parcela. Para estimar el rendimiento se tomó cinco muestras por parcela mediante el método del cuadrante de 1 m², que se fundamenta en ubicar un marco sobre el forraje [7].

Luego se procedió a cosechar manualmente con una hoz colocando la muestra en una bolsa, para luego llevar al Centro de Investigación y Producción Quimsachata donde se deshidrató en una estufa universal de secado MEMMERT de convención natural a 60 °C por 48 horas, pasado ello se pesó la muestra en una balanza digital CAMRY modelo EK5055 de capacidad de 5 kg.

Diseño experimental y análisis de datos

Se utilizó el diseño experimental completamente al Azar con arreglo factorial de 2 x 2 (2 zonas agroecológicas, 2 condiciones de siembra). Se inició realizando las pruebas de contraste de normalidad Shapiro Wilk y la prueba de homogeneidad de varianzas. Posterior a ello, se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación múltiple de Tukey. Para el análisis de datos se utilizó el programa estadístico SAS versión 9.4.

Resultados

Evaluación de altura de planta y rendimiento de materia seca según zona agroecológica

En el cuadro 1, se muestra los valores de altura de planta (cm) según zona agroecológica puna húmeda y seca en la región Puno, para puna húmeda en seis comunidades presentaron una altura de planta en promedio de 41 cm y para puna seca con el mismo número de comunidades se obtuvieron una altura de planta de 21 cm en promedio. Por otro lado, para rendimiento en

seis comunidades de puna húmeda se determinó en promedio un rendimiento de 6551 kg/MS/ha, en puna seca en seis comunidades se encontró rendimiento en promedio de 1623 kg/MS/ha, dichas evaluaciones se realizaron en el mes de abril del año 2018.

Cuadro 1. Altura de planta y rendimiento de *A. sativa* variedad dorada cayuse según zona agroecológica.

Zona Agroecológica	n	Altura de planta (cm) promedio	Rendimiento (kg/MS/ha) promedio
Puna húmeda	6	41 ^a	6551 ^a
Puna seca	6	21 ^a	1623 ^b

^{a,b}Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), prueba Tukey.

Los valores de rendimiento (kg/MS/ha) evaluados en dos zonas agroecológicas: puna húmeda y puna seca con seis comunidades cada una, presentaron diferencia estadística significativa ($p < 0.05$), donde el mayor promedio de rendimiento en materia seca se obtuvo en la zona agroecológica puna húmeda (cuadro 1).

Evaluación de altura de planta y rendimiento de materia seca según condición de siembra

En el cuadro 2, se muestra los valores de altura de planta (cm) según condición de siembra dormideros y terreno de rompe en la región Puno, para siembra en dormideros en seis comunidades presentaron una altura de planta en promedio de 39 cm y para terreno de rompe con el mismo número de comunidades se obtuvieron una altura de planta de 23 cm en promedio.

Para rendimiento según condición de siembra en dormideros y terreno de rompe en seis comunidades por cada condición se determinó en promedio un rendimiento de 5394 kg/MS/ha y 2779 kg/MS/ha respectivamente.

Cuadro 2. Altura de planta y rendimiento de *Avena sativa* variedad dorada cayuse según condición de siembra.

Condición de siembra	n	Altura de planta (cm) promedio	Rendimiento (kg/MS/ha) promedio
Dormideros	6	39 ^a	5394 ^a
Terreno de rompe	6	23 ^a	2779 ^a

^aLetras iguales en la misma columna indican que no hay diferencia significativa ($p < 0.05$), prueba Tukey.

Evaluación de altura de planta y rendimiento de materia seca según combinaciones

En el cuadro 3, se muestra los valores de altura de planta (cm) según combinaciones zona agroecológica por condición de siembra en la región Puno, los promedios fluctuaron entre 50 y 14 cm para las combinaciones puna húmeda con dormideros y puna seca con terreno de rompe respectivamente.

Cuadro 3. Altura de planta y rendimiento de *Avena sativa* variedad dorada cayuse según combinaciones.

Combinaciones ZA*CS	N	Altura de planta (cm) promedio	Rendimiento (kg/MS/ha) promedio
Puna húmeda con dormideros	3	50 ^a	8917 ^a
Puna húmeda con terreno rompe	3	31 ^a	4185 ^b
Puna seca con dormideros	3	28 ^a	1872 ^b
Puna seca con terreno rompe	3	14 ^a	1374 ^b

^{a,b}Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa ($p < 0.05$), prueba Tukey.

ZA*CS=zona agroecológica * condición de siembra

Los valores de rendimiento (kg/MS/ha) evaluados en combinaciones de zona agroecológica por condición de siembra, presentaron diferencia estadística significativa ($p < 0.05$), donde la mejor combinación fue para puna húmeda con dormideros, en tanto las combinaciones puna húmeda con terreno de rompe, puna seca con dormideros y puna seca con terreno rompe, no presentaron diferencia estadística significativo entre sí (cuadro 3).

Conclusiones

Guimac [8] en la región Amazonas, provincia de Chachapoyas, distrito de Sonche, anexo Nuevo Olmal a una altitud de 2531 m, para la variedad dorada cayuse obtuvo 37700 kg/MV/ha y un rendimiento de 9146.02 kg/MS/ha, y una de planta de 59.86 cm; estos resultados son similares para la combinación puna húmeda con dormidero, esto probablemente se debe a la zona agroecológica y materia orgánica existente en los dormideros.

Concilco et al. [9] en el estado de Coahuila, Torreón, a una altitud promedio de 1100 m, de clima seco-desértico, con promedios anuales de precipitación y temperatura de 258 mm y 21 °C, respectivamente, obtuvieron, para altura de planta 119.94 cm, al aplicar biocarbón más fertilización convencional, estos resultados son superiores a la altura de planta promedio obtenida en esta investigación (50 cm), probablemente debido a que, no se aplicó enmienda ni fertilización, además de la variedad utilizada.

En el estudio realizado por Arango [10] en la región Junín, distrito de Jauja, ubicada a una altitud de 3340 m, utilizando avena forrajera cayuse en condiciones controladas, bajo la condición de siembra: con restricción de lluvia al 60 % y sin restricción de lluvia; para altura de planta se obtuvo 54.5 cm y 74.9 cm con restricción y sin restricción respectivamente, estos resultados son superiores a los resultados obtenidos en el presente estudio, probablemente se deba a la diferencia de altitud. En el mismo estudio de Arango para rendimiento se obtuvo 4.2 ± 0.5 t/MS/ha sin restricción, 1.7 ± 1.2 t/MS/ha con restricción; siendo el resultado de sin restricción superior para rendimiento en PS y TR. Sin embargo, el mismo, es inferior para PH y D; y, con restricción de lluvia se asemeja a PS y TR, probablemente esta semejanza se deba a las escasas lluvias en la zona agroecológica de puna seca.

En cinco provincias ganaderas de la región de Puno, situadas a una altitud que varía entre 3812 y 4000 m., en avena forrajera (cultivar Tayco), encontraron rendimientos de MS que oscilan de 5.88 a 6.93 t/ha, con un promedio de 6.42 ± 1.20 t/ha, estos resultados son similares al estudio realizado en cuanto a rendimiento de PH y D probablemente se deba a que las provincias ganaderas se encuentran en la zona agroecológica de puna húmeda y a la variedad utilizada, sin embargo para PS y TR es superior posiblemente por las condiciones descritas anteriormente [11].

Sedano [12] en Colombia municipio de Vélez departamento Santander sobre una altitud de 2485 m, a los cuatro meses del cultivo mostró para altura de planta 150 cm, para rendimiento 43 t de forraje verde con un porcentaje de materia seca de 25.4 % alcanzando a 11684 kg/MS/ha, para altura de planta estos resultados son superiores posiblemente se deba a la altitud donde se realizó el estudio y la variedad utilizada.

Los resultados encontrados en el experimento son muy inferiores a los resultados encontrados en la Estación Experimental Santa Ana del Instituto Nacional de Investigación Agraria, ubicado a 3259 m, la variedad Cayuse alcanzó una altura de planta de un máximo 138.25 cm y mínimo 114.10 cm; mientras que la producción de materia seca fue de 1.85 kg/m², equivalente a 18500 kg/MS/ha, que se debe posiblemente a la diferencia de altitud y condiciones climáticas favorables [3].

Hurtado [13] concluyó que la variedad dorada cayuse obtuvo un rendimiento de 10653.75 kg/MS/ha; mientras que, Argote y Halanoca [14] realizaron estudios a 3800 m, reportando que la variedad dorada cayuse alcanzó una altura de 52.1 cm, resultados superiores para altura de planta y para rendimiento según zona agroecológica y combinaciones, probablemente se deba a la altitud de estudio.

En el estudio realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo de Camélidos Sudamericanos Lachocc - Tambocucho de la Universidad Nacional de Huancavelica a una altitud de 4310 m la avena forrajera Cayuse sembrada asociada con vicia alcanzó una altura de 36.9±3.90 cm y 30.8±1.16 cm según siembra en surco y al voleo respectivamente, según Quintanilla [15], para altura de planta estos resultados son similares ya sea según zona agroecológica, condición de siembra y combinaciones posiblemente se deba a la similitud de altitudes de estudio.

En un suelo Andisol en Colombia, Nariño, ubicado a 2820 m, con fertilización de nitrato de potasio encontró un rendimiento de avena forrajera de 7.61 t/MS/ha [16] resultado ligeramente superior al encontrado en la investigación probablemente debido al tipo de suelo utilizado y la variedad.

Mamani [17] obtuvo resultados inferiores a los de esta investigación bajo condiciones del altiplano de Puno. Obtuvo un rendimiento promedio de 6042 kg/ha. Estos resultados podrían deberse a las condiciones de siembra de cada investigación y al hecho de que esta investigación abarcó a pequeños, medianos y grandes productores y se promedió todos los estratos; concluyendo que la avena forrajera es una excelente alternativa para el ganado lechero bajo condiciones del altiplano de Puno por su buen potencial de rendimiento.

Espinoza-Montes et al. [18] obtuvieron rendimientos para avena forrajera en condiciones de secano a 4035 msnm fue de 3.99 t/ha, resultados inferiores a los de esta investigación, lo que pudo deberse a las diferentes condiciones agroecológicas de cada investigación y al hecho de que en el primer caso la avena forrajera se asoció con vicia a diferencia de esta investigación en el que no hubo cultivo asociado. Santana-Espinoza et al. [19] también obtuvieron rendimientos inferiores para avena forrajera con un valor promedio de 3816 kg/ha para cultivos con aplicación de fertilizantes orgánicos en condiciones agroecológicas de Durango, México.

Torres *et al.* [20] en Bogotá, campus de la Universidad Nacional de Colombia, a una altitud de 2640 m, utilizando 100 % de fertilizante fórmula completa, obtuvieron 32 t/ha de avena variedad cayuse, resultado superior al estudio realizado posiblemente se deba a los factores de altitud, fertilización.

Se llegó a la conclusión de que la zona agroecológica tiene influencia significativa sobre el rendimiento, la condición de siembra no tiene influencia estadística significativa sobre rendimiento y la mejor combinación significativa para rendimiento es puna húmeda con siembra en dormideros. En futuras investigaciones sería importante considerar aspectos relacionados al componente nutricional de la avena forrajera para ampliar el conocimiento de esta especie y recomendar su uso para la alimentación de diferentes tipos de ganado.

Referencias

- [1] INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). (2012, marzo 22). IV Censo Nacional agropecuario. Disponible en: <http://censos.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/>
- [2] Mamani, J. "Desempeño productivo y periodo de recuperación de capital en alpacas madres del CIP Quimsachata, INIA Illpa Puno". Tesis de postgrado. Maestría en Ganadería Andina, Universidad Nacional de Altiplano. Puno, Perú, 2009.
- [3] Noli, C., Asto, R., y Canto A. "Evaluación de variedades de avena forrajera tolerantes a sequías y heladas para producción de forraje verde". Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2003.
- [4] Flores, A. "Manual de pastos y forrajes altoandinos, Lima". ITDG AL, OIKOS. 49 -51 pp, 2005.
- [5] Vega, E. y Torres, D. "Manejo y conservación de pasturas naturales y cultivos temporales". Prácticas de adaptación al cambio climático, pp. 74 – 80, 2013.
- [6] Choque, J. "Producción y manejo de especies forrajeras". Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Altiplano. Edit. Universitario. Puno, Perú. 306 pp, 2005.
- [7] Mostacedo, B. y Fredericksen, TS. "Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal". Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR. 87pp, 2000.
- [8] Guimac, W. "Adaptabilidad de tres variedades de avena forrajera (Avena sativa L.), en dos sistemas de siembra, para determinar la composición nutricional, en el distrito Sonche, Amazonas 2019". Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Amazonas, Perú. 2019.
- [9] Concilco, E., Moreno, A., García, M., Quiroga, H. M., García, O. A. "Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera", Terra Latinoamericana, vol. 36, no 3, pp. 221-228, 2018.
- [10] Arango, S. "Evaluación agronómica y valor nutritivo de avena (Avena sativa) bajo condiciones de restricción de lluvia en la sierra central del Perú". Tesis de postgrado. Escuela de Posgrado, Universidad Agraria La Molina. Lima, Perú, 2019.
- [11] Mamani, J. y Cotacallapa, FH. "Rendimiento y calidad nutricional de avena forrajera en la región Puno", Revista de Investigaciones Altoandinas, vol 20, no 4, pp. 385-400, 2018. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.415>
- [12] Sedano, M. "Evaluación del rendimiento productivo y valor nutricional de la avena forrajera (Avena sativa) en dos estados de maduración diferentes, en la Vereda el Gaital del municipio de Vélez Santander". Tesis de pregrado. Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Santander, España, 2018.
- [13] Hurtado, L. "Estudio comparativo de rendimiento en 31 variedades de avena forrajera en el valle del Mantaro". Tesis de pregrado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú, 1965.
- [14] Argote, G., y Halanoca. "Evaluación y selección de gramíneas forrajeras tolerantes a condiciones climáticas del altiplano de Puno". Programa Nacional de Investigación en Pastos y Forrajes, Estación Experimental Agraria Illpa, INIA, Puno-Perú 5 pp, 2007.
- [15] Quintanilla, A. "Efecto de tres variedades de Avena Forrajera asociadas con vicia sativa sobre parámetros productivos y químicos en dos tipos de siembra". Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú, 2016.
- [16] Silva, A., Coral, DM. y Menjivar, JC. "Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la actividad microbial y rendimiento de avena forrajera en un suelo andisol del departamento de Nariño, Colombia". Tesis de postgrado. Maestría en Ciencias Agrarias, Universidad de Nariño. Nariño, Colombia, 2006.
- [17] Mamani, J. "Avena forrajera: rendimiento, valor nutricional, ventaja comparativa y competitiva en la región Puno". Tesis de posgrado. Doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú, 2016.
- [18] Espinoza-Montes, F., Nuñez-Rojas, W., Ortiz-Guizado, I., Choque-Quispe, D. "Producción de forraje y competencia interespecífica del cultivo asociado de avena (Avena sativa) con vicia (Vicia sativa) en condiciones de seco y gran altitud", Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú, vol. 29, no 4, pp. 1237-1248, 2018.
- [19] Santana-Espinoza, S., Rosales-Serna, R., Domínguez-Martínez, P. A., Sierna-Zurita, D., Ríos-Saucedo, J. C., Carrillo-Parra, A. "Fertilización orgánica para la producción alta y sostenible de forraje de avena en Durango, México", Ciencia e Innovación, vol. 3, no 2, pp. 671-678, 2020.
- [20] Torres, E. Ariza, D., Baena, C. D., Cortés, S., Becerra, L., Riaño, C. A. "Efecto de la fertilización en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la avena (Avena sativa)", Pastos y Forrajes, vol. 39, no 2, pp. 102-110, 2006.

Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca

Applications behind biochemical wood degradation by Xylophagous fungi: brown and white rot

Catalina Mena-Morales¹, Camila Morales-Rodríguez², Itnan Vargas-Venegas³, Brayán Villalobos-Quintanilla⁴, Víctor Víquez-Muñoz⁵

Fecha de recepción: 18 de noviembre, 2021
Fecha de aprobación: 3 de abril, 2022


Mena-Morales, C., Morales-Rodríguez, C., Vargas-Venegas, I., Villalobos-Quintanilla, B., Víquez-Muñoz, V. Aplicaciones biotecnológicas de la degradación bioquímica de madera por acción de hongos Xilófagos: pudrición parda y blanca. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 97-105.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5997>


1 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cmenam2001@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0869-4479>


2 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: camimorales150@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-1389-7323>

3 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ItnanVargasVenegas@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6379-7430>

4 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: brayan.v.q10@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-7273-4175>

5 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: victorm1106@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5710-6189>

Palabras Clave

Reacciones Fenton; enzimas lignocelulósicas; biorremediación; agroquímicos; pigmentos; inmovilización; metales pesados.

Resumen

Entre los factores bióticos con habilidad para degradar la madera se encuentran los hongos xilófagos. Estos organismos se clasifican según las preferencias de sustrato de crecimiento y sus patrones de descomposición de la madera; sobresaliendo aquellos causantes de las podredumbres blanca y parda o marrón. La principal diferencia entre ellos reside en su mecanismo de degradación, pues la podredumbre blanca se basa en la hidrólisis enzimática; mientras que la podredumbre marrón realiza una modificación de la lignina mediante la química de Fenton y especies reactivas de oxígeno, para llevar a cabo una posterior hidrólisis enzimática. Tanto la pudrición blanca como la parda poseen valiosas aplicaciones biotecnológicas en cuanto a biorremediación. Entre ellas sobresalen el manejo de desechos, degradación de químicos persistentes en el ambiente, remoción de metales tóxicos, entre otros.

Keywords

Fenton reaction; lignocellulosic enzymes; bioremediation; agrochemicals; pigments; immobilization; heavy metals.

Abstract

There are different biotic factors that capable of degrading wood, among them xylophagous fungi. Amid the main types of these fungi are those that cause white rot and brown rot. These fungi can be classified according to growth substrate preferences and, wood decomposition patterns. While white rot fungi degrade wood through enzymatic hydrolysis, brown rot fungi follow a two-step degrading process involving lignin-modifying reactive oxygen species derived from Fenton reaction, followed by specialized enzymes that hydrolyze cellulose and hemicellulose. Both types of rot fungi have remarkable biotechnological applications regarding bioremediation. Among the principal applications are waste management, chemical degradation of environmentally persistent compounds, metal detox and others.

Introducción

La madera es uno de los materiales celulósicos más resistentes, aunque existen organismos capaces de degradarla, denominados xilófagos [1], [2]. Los hongos xilófagos se pueden clasificar según sus preferencias de sustrato de crecimiento y sus patrones de descomposición, sobresaliendo los hongos de podredumbre blanca (HPB) y marrón o parda (HPP) [3]. La degradación de madera es de gran importancia a nivel ecológico, pues participa en los ciclos biogeoquímicos del carbono y del nitrógeno. Además, a nivel industrial presenta gran cantidad de aplicaciones [4], [5].

En términos generales, la mayoría de los HPP y HPB son *Basidiomycota Agaricomycete*, dada la divergencia teorizada de un ancestro común [6]. No obstante, los HPP se diferencian en que sufrieron una delección de los genes degradadores de lignina [7] y, a modo de adaptación, emplean peroxidasas generales no ligninolíticas de bajo potencial redox [8]. Por otro lado, los HPB degradan la lignina mediante un sistema enzimático extracelular ligninolítico [9].

Los HPP son capaces de degradar celulosa y hemicelulosa, pero solamente modificar la lignina [10]. Estos utilizan mecanismos tanto oxidativos como hidrolíticos [11], caracterizados por una expresión genética diferenciada [12]. La fase oxidativa demanda la expresión de peroxidasas para la reacción de Fenton, modificando la lignina al exponerla a especies reactivas de oxígeno (ROS), abriendo la pared celular y el xilema [13]. Luego, la hidrólisis de polisacáridos requiere la expresión de enzimas activas en carbohidratos (CAZymes), que hidrolizan completamente la celulosa y la hemicelulosa [8], [14], [15].

Cabe resaltar que la generación de ROS derivadas de Fenton ocurre solo dentro de la pared celular, que es inaccesible a las enzimas [13]. Por tanto, para equilibrar los potenciales productivos y deletéreos de las ROS, los hongos de la pudrición parda optimizan su concentración para segregar la producción de celulasas, evitando la oxidación enzimática [11, 15]. Entre las especies de HPP más estudiadas se encuentran *Postia placenta* [12], *Fomitopsis pinicola* [16], *Serpula lacrymans* y *Coniophora puteana* [8].

Por otro lado, los HPB son capaces de degradar completamente la lignina aeróbicamente [17]; mediante sistemas enzimáticos oxidativos intracelulares, como el citocromo P450, y extracelulares, como las lacasas y peroxidasas [18]. Los métodos de descomposición pueden ser simultáneos; cuando todos los polisacáridos componentes de la pared celular se degradan al mismo tiempo, selectivos; cuando la lignina y las hemicelulosas se degradan preferentemente; o duales, mezclando ambas estrategias descritas [19]. Por ejemplo, *Grifola frondosa* causa una deslignificación selectiva, mientras *Trametes versicolor* provoca degradación simultánea; aunque otros como *Pleurotus ostreatus* utilizan modos duales de degradación [20].

Los HPB son valiosos a nivel industrial por su plasticidad. Especies selectivas son de mayor interés en el ámbito bioindustrial, ya que eliminan la lignina, pero dejan intacta la celulosa [19]. También se han reportado HPB que causan ambos tipos de degradación dentro de un solo sustrato [21]. Además, estos hongos son comunes en los bosques de especies frondosas, ya que tienen un tipo de madera más susceptible [22]. Algunas especies incluso pueden variar su expresión génica según la composición de la pared celular que se busca degradar [20].

Por tanto, los HPP varían en crecimiento, estructura, sustancias secretadas y rutas metabólicas, generando diversas aplicaciones [23]. Del mismo modo, los sistemas ligninolíticos de los HPB generan gran interés por su plasticidad [19]. Por ello, mediante esta revisión, se pretende divulgar las principales aplicaciones biotecnológicas reportadas detrás de los mecanismos utilizados por los hongos xilófagos causantes de las pudriciones marrón y blanca.

Aplicaciones biotecnológicas de los hongos xilófagos

Hongos de podredumbre blanca

Alrededor del mundo, las industrias liberan en los efluentes entre 10% y 15% de los pigmentos empleados en procesos de tinción, por lo que el manejo inadecuado de estos colorantes conduce a la contaminación de aguas [24]. El robusto sistema enzimático de los HPB hace que sean capaces de metabolizar varios tipos de hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles, dioxinas, entre otros [25], por lo cual han sido estudiados para la degradación de colorantes.

Los colorantes industriales son difíciles de degradar por su estructura aromática, por lo que se han investigado métodos físicos, químicos, electroquímicos y biológicos capaces de eliminarlos [26], [27]. Tratamientos abióticos como el carbón activado, precipitación, ozonización, y ósmosis inversa han presentado resultados efectivos. No obstante, estas estrategias presentan

limitaciones por el uso intensivo de químicos, generación de desechos y elevado costo [28]. Los tratamientos biológicos se han popularizado, pues representan menores efectos nocivos sobre el ambiente y una relación costo-efectividad más beneficiosa [29], [30].

Asimismo, se han reportado hongos aerobios degradadores de contaminantes orgánicos como pigmentos azoicos [31]. Estos sistemas de biorremediación por HPB se han visto afectados por problemas de adsorción, por lo que se ha propuesto la producción y el uso individual de sus enzimas [28]. El potencial de degradación de colorantes podría deberse a la similitud estructural entre las moléculas de lignina y pigmentos, particularmente por su anillo fenólico [32], [27].

Los pigmentos se distinguen entre sí por la región cromófora de su molécula, por lo que varía la efectividad de distintos HPB su degradación [32]. Por ejemplo, el cromóforo Reactive Violet 1 es degradado con mayor efectividad por *Ganoderma cupreum* AG1 [33]. Otras especies con capaces de actuar sobre colorantes similares, como *Pseudolagarobasidium acaciicola* AGST3 que degrada los cromóforos Violet P3P, Green ME4BL, Blue 3R, Direct black 22, Green HE4G y Reactive red M5B [34]. Algunas otras especies con habilidad oxidativa sobre pigmentos son *Trametes hirsuta*, *Aspergillus niger*, *P. chrysosporium*, y *T. versicolor* [28].

Además, los hongos xilófagos tienen un alto potencial para degradar moléculas residuales de pesticidas [35]. Muchos de los pesticidas son persistentes, bioacumulativos y tóxicos para los seres vivos, asociándoseles con graves problemas de salud como el cáncer, trastornos neurológicos, respiratorios, y afecciones del sistema reproductivo [36]. Asimismo, los pesticidas degradan la tierra, contaminan el aire y agotan el recurso hídrico [37]. En ese sentido, la biorremediación es una alternativa eficaz que se ha aplicado extensamente para eliminar contaminantes ambientales mediante el uso de organismos como los HPB [38].

La especie *Trametes versicolor* se reconoce por su considerable poder de degradación de herbicidas. [39] Beltrán-Flores y colaboradores (2021), demostraron que al inmovilizarlo en madera de *Quercus ilex* degradó pesticidas como el diurón y el bentazón con un rendimiento del 93% y 90% respectivamente. Otro estudio, reportó la remoción del 94% del diurón en aguas agrícolas de desecho mediada por *T. versicolor* inmovilizado en astillas de pino [40]. Adicionalmente, se han reportado otras especies de HPB en el tratamiento de variados pesticidas como el neonicotinoide, carbofurano, fipronil, entre muchos otros [41]–[43]. La inmovilización de la biomasa fúngica en soportes naturales es una estrategia utilizada para propiciar una rápida colonización del hongo, evitando cambios en el pH, temperatura o pérdida de biomasa [44].

En cuanto a la producción de biogas, la biomasa lignocelulósica como materia prima es biorrenovable, abundante y de barata [45]. La dificultad para degradarla ha llevado a que se implementen procesos mecánicos, térmicos, químicos, biológicos y sus combinaciones, para acelerar su hidrólisis y perfeccionar la producción de metano [46]. Los HPB sobresalen por su efectividad en el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica con este fin [47].

[48] Huang, Yuan, y Li (2020) investigaron el pretratamiento de pajas de arroz con *Pleurotus ostreatus* para producir biometano. El mayor rendimiento fue de 269 mL·g⁻¹ SV transcurridos 25 días de tratamiento, representando una mejora del 26.9% en comparación con pajas no tratadas. En este caso, la acción enzimática del hongo cambió las propiedades fisicoquímicas del material, aumentando a su vez la adsorción de celulasa y xilanas. Además, [49] Alexandropoulou *et al.* (2017) estudiaron la acción de *Leiotrametes menziesii* y *Abortiporus biennis* en el pretratamiento de aserrín de sauce, obteniendo que la remoción de lignina por *L. menziesii* fue del 30.5% luego de 30 días, mientras que la de *A. biennis* fue de 17.1%

Hongos de podredumbre parda o marrón

Los HPP producen altos niveles de ácido oxálico y otros ácidos policarboxílicos quelantes y agentes reductores, por lo que pueden utilizarse para la eliminación de metales tóxicos a través de bioquelación o biolixiviación [50]. Existen preservantes de madera a base de cobre (Cu) altamente tóxicos, utilizados como biocidas contra hongos xilófagos. Sin embargo, existen HPP tolerantes al Cu [51], que producen altas cantidades de ácido oxálico e inducen la precipitación de los iones de Cu con oxalato, mediante la quelación [52]. Los complejos formados se depositan en la superficie de la madera de forma inerte, permitiendo la detoxificación [53], [54].

En un estudio, se evaluó la eficacia de la remediación fúngica del cobre cromado en postes de Eucalipto (*Corymbia citriodora*) tratados con Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), un preservante de madera [55]. De los metales componentes del CCA, el cobre fue el mejor removido por los hongos utilizados: *Fibroporia radiculosa* extrajo un 96% y *Coniophora puteana*, *Antrodia vaillantii* y *Postia placenta* extrajeron un 90% del contenido de Cu [56]. Asimismo, [57] Hattory *et al.* (2015) cultivaron bloques de cedro japonés (*Cryptomeria japonica*) tratados con sulfato de cobre (CuSO₄) con dos especies de HPP. Al cabo de seis semanas de tratamiento, *Fomitopsis palustris* TYP-0507 removió el 45.9% del cobre y *Antrodia xantha* Shiga-1F extrajo un 40.7%.

Asimismo, dado que los HPP utilizan la reacción de Fenton, son capaces de generar radicales hidroxilos (OH⁻) capaces de degradar compuestos xenobióticos, antibióticos, tintes, pesticidas y otros [58]. Se ha demostrado la capacidad de degradación del pesticida dicloro difenil tricloroetano (DDT) por el hongo *Formitopsis pinicula* en un co-cultivo con la bacteria *Bacillus subtilis*, cuya máxima degradación fue de alrededor del 86% [59]. Otro estudio, demostró que el HPP *Daedalea dickinsii* fue capaz de decolorizar el azul de metileno en un 54% [60]. Igualmente, [61] Purnomo *et al.* (2020) demostraron que al adicionar *Pseudomonas aeruginosa* a un cultivo de *Gloephyllum trabeum*, es posible degradar el pigmento azoderivado llamado naranja de metilo, en un 88.67%.

Conclusiones y Perspectivas Futuras

Dadas las diferencias entre la podredumbre blanca y marrón, hay una amplia variedad de aplicaciones para los procesos biológicos que ocurren en estos organismos. Tal es el caso de la producción de ácidos policarboxílicos en hongos de la podredumbre marrón, que exhiben propiedades bioquelatantes útiles para el tratamiento de la contaminación con metales tóxicos. Asimismo, se han investigado formas de aprovechar las enzimas generadas por los hongos de podredumbre blanca, entre las cuales destacan la degradación de colorantes y restos de pesticidas, así como el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica para producción de biogas.

La inmovilización de hongos xilófagos para degradar pesticidas podría ser útil para llevar a cabo la biorremediación a gran escala. Un reto actual para el uso de hongos xilófagos para estos fines es su baja resistencia a condiciones medioambientales no parametrizadas [62]. Por tanto, perfeccionar las técnicas de inmovilización existentes y estudiar nuevos soportes naturales es crucial para futuras proyecciones a gran escala. Asimismo, la profundización en la investigación sobre las aplicaciones en los HPP es necesaria, ya que por su capacidad de bioquelación podría aprovecharse en aplicaciones agrícolas como organismos solubilizadores de fosfato [63].

Por otro lado, la utilización de HPB como un medio efectivo de pretratamiento de biomasa lignocelulósica para la producción de biogas representa una importante aplicación para los desechos orgánicos en la agricultura. Actualmente una gran cantidad de desechos lignocelulósicos no se aprovechan y se descartan mediante técnicas de alto impacto ambiental,

como la quema [64]. En otros casos, estos residuos agrícolas no reciben un tratamiento de descarte, volviéndose un factor de riesgo al atraer de plagas dañinas para los cultivos [65]. Por tanto, la aplicación de HPB podría ayudar favorecer el aprovechamiento de los residuos agrícolas, convirtiéndolos en una fuente de energía alternativa amigable con el ambiente.

Referencias

- [1] B. Goodell, J. E. Winandy, y J. J. Morrell, "Fungal Degradation of Wood: Emerging Data, New Insights and Changing Perceptions," *Coatings*, vol. 10, no. 12, p. 1210, Dec. 2020, doi: 10.3390/coatings10121210.
- [2] G. Oliveira, F. de Oliveira, S. B.-P. S. Integrity, 2018, "Wood preservation for preventing biodeterioration of Cross Laminated Timber (CLT) panels assembled in tropical locations," *Elsevier*, Recuperado: 1 de Octubre 2021. [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618301331>
- [3] F. S. Kraha, C. Bässler, C. Heibl, J. Soghigian, H. Schaefer, y D. S. Hibbett, "Evolutionary dynamics of host specialization in wood-decay fungi," *BMC Evolutionary Biology*, vol. 18, no. 1, Agosto 2018, doi: 10.1186/S12862-018-1229-7.
- [4] M. Köhl, H. P. Ehrhart, M. Knauf, y P. R. Neupane, "A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals," *Ecological Indicators*, vol. 111, p. 106057, Abril 2020, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2019.106057.
- [5] T. S.- Forests, 2017, "Arthropod diversity and functional importance in old-growth forests of North America," *mdpi.com*, doi: 10.3390/f8040097.
- [6] T. Mali, J. Kuuskeri, F. Shah, y T. K. Lundell, "Interactions affect hyphal growth and enzyme profiles in combinations of coniferous wood-decaying fungi of Agaricomycetes," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 9, p. e0185171, Septiembre 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0185171.
- [7] G. N. Presley, E. Panisko, S. O. Purvine, y J. S. Schilling, "Coupling Secretomics with Enzyme Activities To Compare the Temporal Processes of Wood Metabolism among White and Brown Rot Fungi," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, no. 16, pp. 159–177, Agosto 2018, doi: 10.1128/AEM.00159-18.
- [8] T. K. Lundell, M. R. Mäkelä, R. P. de Vries, y K. S. Hildén, "Genomics, Lifestyles and Future Prospects of Wood-Decay and Litter-Decomposing Basidiomycota," *Advances in Botanical Research*, vol. 70, pp. 329–370, Enero 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-397940-7.00011-2.
- [9] E. Rouches, I. Herpoël-Gimbert, J. P. Steyer, y H. Carrere, "Improvement of anaerobic degradation by white-rot fungi pretreatment of lignocellulosic biomass: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.317.
- [10] W. Montejo-Mayo, E. D.-R.- Phyton, 2021, "Inhibitory Effect of N, N-Dimethylhexadecylamine on the Growth of White-Rot Fungus *Trametes versicolor* (L.) en Wood," *search.proquest.com*, Recuperado: 10 de Octubre 2021. [en línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/openview/b03b050aca11b5c8dd14ea8d69189efc/1?pq-origsite=gscholarycbl=4585451>
- [11] G. N. Presley, E. Panisko, S. O. Purvine, y J. S. Schilling, "Coupling Secretomics with Enzyme Activities To Compare the Temporal Processes of Wood Metabolism among White and Brown Rot Fungi," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, no. 16, pp. 159–177, Agosto 2018, doi: 10.1128/AEM.00159-18.
- [12] J. Zhang, G.N. Presley, K.E. Hammel, J-S. Ryu, J.R. Menke, M. Figueroa, D. Hu, G. Orr, y J.S. Schilling, "Localizing gene regulation reveals a staggered wood decay mechanism for the brown rot fungus *Postia placenta*," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 113, no. 39, pp. 10968–10973, Septiembre 2016, doi: 10.1073/PNAS.1608454113.
- [13] Y. Zhu, N. Plaza, Y. Kojima, M. Yoshida, J. Zhang, J. Jellison, S. Venkatesh Pingali, H. O'Neill y B. Goodell, "Nanostructural Analysis of Enzymatic and Non-enzymatic Brown Rot Fungal Deconstruction of the Lignocellulose Cell Wall," *Frontiers in Microbiology*, vol. 0, p. 1389, Junio 2020, doi: 10.3389/FMICB.2020.01389.
- [14] K. Hildén y M. R. Mäkelä, "Role of Fungi in Wood Decay," in *Reference Module in Life Sciences*, Elsevier, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.12424-0>.
- [15] G. N. Presley, J. Zhang, y J. S. Schilling, "A genomics-informed study of oxalate and cellulase regulation by brown rot wood-degrading fungi," *Fungal Genetics and Biology*, vol. 112, pp. 64–70, Marzo 2018, doi: 10.1016/J.FGB.2016.08.004.
- [16] B. Wu, J. Gaskell, B.W. Held, C. Toapanta, T. Vuong, S. Ahrendt, A. Lipzen, J. Zhang, J.S. Schilling, E. Master, I.V. Grigoriev, R.A. Blanchette, D. Cullen y D.S. Hibbett, "Substrate-Specific Differential Gene Expression y RNA Editing in the Brown Rot Fungus *Fomitopsis pinicola*," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 84, no. 16, Agosto 2018, doi: 10.1128/AEM.00991-18.

- [17] N. Nayan, A. S. M. Sonnenberg, W. H. Hendriks, y J. W. Cone, "Screening of white-rot fungi for bioprocessing of wheat straw into ruminant feed," *J. Appl. Microbiol.*, 2018, doi: 10.1111/jam.13894.
- [18] I. A. Vasiliadou, R. Molina, M. I. Pariente, K. C. Christoforidis, F. Martinez, y J. A. Melero, "Understanding the role of mediators in the efficiency of advanced oxidation processes using white-rot fungi," *Chem. Eng. J.*, 2019, doi: 10.1016/j.cej.2018.11.035.
- [19] L. Reinprecht, *Wood Deterioration, Protection and Maintenance*. Oxford, UK: John Wiley y Sons, Ltd, 2016. doi: 10.1002/9781119106500.
- [20] Bari, E., Daniel, G., Yilgor, N., Kim, J. S., Tajick-Ghanbary, M. A., Singh, A. P., & Ribera, J. (2020). Comparison of the Decay Behavior of Two White-Rot Fungi in Relation to Wood Type and Exposure Conditions. *Microorganisms*, 8(12), 1931. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121931>
- [21] S. Rodríguez-Couto, "Industrial and environmental applications of white-rot fungi," *Mycosphere*, vol. 8, no. 3, pp. 456–466, Mar. 2017, doi: 10.5943/mycosphere/8/3/7.
- [22] J. Piętko, A. Gendek, J. Malat'ák, J. Velebil, y T. Moskalik, "Effects of selected white-rot fungi on the calorific value of beech wood (*Fagus sylvatica* L.)," *Biomass and Bioenergy*, vol. 127, p. 105290, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2019.105290.
- [23] G. Presley, J. S.-A., 2017, "Distinct growth and secretome strategies for two taxonomically divergent brown rot fungi," *Am Soc Microbiol*, vol. 83, no. 7, pp. 2987–3003, Abril 2017, doi: 10.1128/AEM.02987-16.
- [24] L. Hossain, S. K. Sarker, y M. S. Khan, "Evaluation of present and future wastewater impacts of textile dyeing industries in Bangladesh," *Environ. Dev.*, vol. 26, pp. 23–33, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.ENVDEV.2018.03.005.
- [25] R. K. Pandey, S. Tewari, y L. Tewari, "Lignolytic mushroom *Lenzites elegans* WDP2: Laccase production, characterization, and bioremediation of synthetic dyes," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 158, pp. 50–58, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.ECOENV.2018.04.003.
- [26] R. G. Saratale, G. D. Saratale, J. S. Chang, y S. P. Govindwar, "Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 42, no. 1, pp. 138–157, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.JTICE.2010.06.006.F.
- [27] Mcyotto, Q. Wei, D. K. Macharia, M. Huang, C. Shen, y C. W. K. Chow, "Effect of dye structure on color removal efficiency by coagulation," *Chem. Eng. J.*, vol. 405, p. 126674, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.CEJ.2020.126674.
- [28] S. G. Rudakiya, Darshan, Archana, Tripathi y A. Gupte, "Fungal Bioremediation: A Step Towards Cleaner Environment". *Advancing Frontiers in Mycology y Mycotechnology*, 229–249 | 10.1007/978-981-13-9349-5_9. https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/978-981-13-9349-5_9
- [29] W. Przystaś, E. Zabłocka-Godlewska, y E. Grabińska-Sota, "Efficiency of decolorization of different dyes using fungal biomass immobilized on different solid supports," *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 49, no. 2, pp. 285–295, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.BJM.2017.06.010.
- [30] R. Ilamathi, A. Merline Sheela, y N. Nagendra Gandhi, "Comparative evaluation of *Pseudomonas* species in single chamber microbial fuel cell with manganese coated cathode for reactive azo dye removal," *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 144, p. 104744, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.IBIOD.2019.104744.
- [31] C. Nie, J. Dong, P. Sun, C. Yan, H. Wu, y B. Wang, "An efficient strategy for full mineralization of an azo dye in wastewater: a synergistic combination of solar thermo- and electrochemistry plus photocatalysis," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 58, pp. 36246–36255, Jul. 2017, doi: 10.1039/C7RA05797K.
- [32] H. Zhang, H. Yang, K. Xie, A. Hou, y A. Gao, "Novel reactive dyes with intramolecular color matching combination containing different chromophores," *Dye. Pigment.*, vol. 159, pp. 576–583, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.DYEPIG.2018.07.031.
- [33] M. Gahlout, • Darshan, M. Rudakiya, S. Gupte, • Akshaya Gupte, y A. Gupte, "Laccase-conjugated amino-functionalized nanosilica for efficient degradation of Reactive Violet 1 dye," *Int. Nano Lett.*, vol. 7, pp. 195–208, 2017, doi: 10.1007/s40089-017-0215-1.
- [34] S. Thakur y A. Gupte, "Optimization and hyper production of laccase from novel agaricomycete *Pseudolagarobasidium acaciicola* AGST3 and its application in in vitro decolorization of dyes," *Ann. Microbiol.*, vol. 65, no. 1, pp. 185–196, 2015, doi: 10.1007/s13213-014-0849-4.
- [35] H. Khatoon, J. P. N. Rai, y A. Jillani, "Role of fungi in bioremediation of contaminated soil," en *Fungi Bio-Prospect in Sustainable Agriculture, Environment and Nano-technology*, Academic Press, 2021, pp. 121–156. doi: 10.1016/B978-0-12-821925-6.00007-1.
- [36] L. Rani, K. Thapa, N. Kanojia y N. Sharma, "An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 283, p. 124657, 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.124657.

- [37] Y. Mehmood, M. Arshad, N. Mahmood, H. Kächele, y R. Kong, "Occupational hazards, health costs, and pesticide handling practices among vegetable growers in Pakistan," *Environmental Research*, vol. 200, pp. 111–340, 2021, doi: 10.1016/J.ENVRES.2021.111340.
- [38] R. Zhuo y F. Fan, "A comprehensive insight into the application of white rot fungi and their lignocellulolytic enzymes in the removal of organic pollutants," *Science of The Total Environment*, vol. 778, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.146132.
- [39] E. Beltrán-Flores, M. Sarrà, y P. Blánquez, "Pesticide bioremediation by *Trametes versicolor*: Application in a fixed-bed reactor, sorption contribution and bioregeneration," *Science of The Total Environment*, vol. 794, p. 148386, 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148386.
- [40] E. Beltrán-Flores, J. Torán, G. Caminal, P. Blánquez, y M. Sarrà, "The removal of diuron from agricultural wastewaters by *Trametes versicolor* immobilized on pinewood in simple channel reactors," *Science of The Total Environment*, vol. 728, p. 138414, Ago. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.138414.
- [41] A. Chen, W. Li, X. Zhang, C. Shang, S. Luo, R. Cao, y D. Jin, "Biodegradation and detoxification of neonicotinoid insecticide thiamethoxam by white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 417, p. 126017, Set. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126017.
- [42] Z. Li, X. Wang, Z. Ni, J. Bao, y H. Zhang, "In-situ Remediation of Carbofuran-Contaminated Soil by Immobilized White-Rot Fungi," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 29, no. 2, pp. 1237–1243, Ene. 2020, doi: 10.15244/PJOES/102671.
- [43] J. M. Wolfand, G. H. LeFevre, y R. G. Luthy, "Metabolization and degradation kinetics of the urban-use pesticide fipronil by white rot fungus *Trametes versicolor*," *Environmental Science: Processes y Impacts*, vol. 18, no. 10, pp. 1256–1265, Oct. 2016, doi: 10.1039/C6EM00344C.
- [44] P. D. Chaparro Bustos y D. Gómez Perdomo, "Evaluación de la inmovilización de *Trametes versicolor* DSM 3086 en estropajo común (*Luffa cylindrica*)," Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia, 2018.
- [45] L. Capolupo y V. Faraco, "Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 100, no. 22, pp. 9451–9467, Oct. 2016, doi: 10.1007/S00253-016-7884-Y.
- [46] G. Zhen, X. Lu, H. Kato, Y. Zhao, y Y. Y. Li, "Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 559–577, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.187.
- [47] U. Schimpf y R. Schulz, "Industrial by-products from white-rot fungi production. Part II: Application in anaerobic digestion for enzymatic treatment of hay and straw," *Process Biochemistry*, vol. 76, pp. 142–154, Ene. 2019, doi: 10.1016/J.PROCBIO.2018.10.006.
- [48] W. B. Huang, H. R. Yuan, y X. J. Li, "Multi-perspective analyses of rice straw modification by *Pleurotus ostreatus* and effects on biomethane production," *Bioresource Technology*, vol. 296, p. 122365, Ene. 2020, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2019.122365.
- [49] M. Alexandropoulou, G. Antonopoulou, E. Fragkou, I. Ntaikou, y G. Lyberatos, "Fungal pretreatment of willow sawdust and its combination with alkaline treatment for enhancing biogas production," *Journal of Environmental Management*, vol. 203, pp. 704–713, Dic. 2017, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2016.04.006.
- [50] T. Singh y A. P. Singh, "White and Brown Rot Fungi as Decomposers of Lignocellulosic Materials and Their Role in Waste and Pollution Control," en *Fungal Applications in Sustainable Environmental Biotechnology*, 1ra ed., Springer, 2016, pp. 233–247. doi: 10.1007/978-3-319-42852-9_9.
- [51] A. Akgul, A. Akgul, J. D. Tang, y S. V Diehl, "Gene Expression Analysis Of Wood Decay Fungus *Fibroporia Radiculosa* Grown In Acq-Treated Wood," *Wood and Fiber Science*, vol. 50, no. 2, pp. 1–12, 2018.
- [52] K. M. Ohno, A. B. Bishell, y G. R. Stanosz, "Gene Expression Analysis of Three Putative Copper-Transporting ATPases in Copper-Tolerant *Fibroporia radiculosa*," *Frontiers in Microbiology*, Dec. 2020, doi: 10.3389/FMICB.2020.586940.
- [53] A. Akgul y A. Akgul, "Mycoremediation of Copper: Exploring the Metal Tolerance of Brown Rot Fungi," *BioResources*, vol. 13, no. 3, pp. 7155–7171, 2018.
- [54] C. Lenz, E. Melcher, R. Möller, y S. Lautner, "Research Papers Microscopic Investigations Concerning In Situ Oxalate Formation By The Brown-Rot Fungus *Poria Placenta*," *Drewno*, vol. 60, no. 199, 2017, doi: 10.12841/wood.1644-3985.215.01.
- [55] D. Xing, S. Magdoui, J. Zhang, y A. Koubaa, "Microbial remediation for the removal of inorganic contaminants from treated wood: Recent trends and challenges," *Chemosphere*, vol. 258, p. 127429, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.127429.

- [56] L. G. da Costa, V. F. Brocco, J. B. Paes, G. T. Kirker, y A. B. Bishell, "Biological and chemical remediation of CCA treated eucalypt poles after 30 years in service," *Chemosphere*, vol. 286, p. 131629, Ene. 2022, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131629.
- [57] T. Hattori, H. Hisamori, S. Suzuki, T. Umezawa, T. Yoshimura, y H. Sakai, "Rapid copper transfer and precipitation by wood-rotting fungi can effect copper removal from copper sulfate-treated wood blocks during solid-state fungal treatment," *International Biodeterioration y Biodegradación*, vol. 97, pp. 195–201, Ene. 2015, doi: 10.1016/J.IBIOD.2014.11.011.
- [58] A. S. Purnomo, V. T. Mauliddawati, M. Khoirudin, A. F. Yonda, R. Nawfa, y S. R. Putra, "Bio-decolorization and novel bio-transformation of methyl orange by brown-rot fungi," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 11, pp. 7555–7564, Jul. 2019, doi: 10.1007/S13762-019-02484-3.
- [59] A. Sariwati, A. S. Purnomo, y I. Kamei, "Abilities of Co-cultures of Brown-Rot Fungus *Fomitopsis pinicola* and *Bacillus subtilis* on Biodegradation of DDT," *Current Microbiology* 2017 74:9, vol. 74, no. 9, pp. 1068–1075, Jun. 2017, doi: 10.1007/S00284-017-1286-Y.
- [60] H. D. Rizqi y A. S. Purnomo, "The ability of brown-rot fungus *Daedalea dickinsii* to decolorize and transform methylene blue dye," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 33, no. 5, pp. 1–9, Abr. 2017, doi: 10.1007/S11274-017-2256-Z.
- [61] A. S. Purnomo, F. D. Rahmadini, R. Nawfa, y S. R. Putra, "The effect of addition of bacterium *Pseudomonas aeruginosa* on biodegradation of methyl orange dye by brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum*," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 980, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/980/1/012074.
- [62] K. S. Becerra Correa, "Análisis cualitativo de literatura sobre las técnicas de biorremediación de suelos por hidrocarburos y contaminantes orgánicos persistentes empleando el hongo *Trichoderma* sp." Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia, 2020.
- [63] I. Rahim, Suherman, Hakza, A. Nasruddin, "The ability of rot fungi from cocoa plant in producing lignocellulosic enzymes." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 270, No. 1, p. 012037) IOP Publishing, 2019.
- [64] L. F. Ocampo Díaz, A.S.R. Pineda, P.A. Acevedo-Pabón e I. Cabeza Rojas, "Vigilancia tecnológica asociada a los pretratamientos para la generación de biogás a partir de sustratos lignocelulósicos." Recuperado el 16 de noviembre del 2021. [en línea]. Disponible en: shorturl.at/euBUW
- [65] J.A. Solórzano, J. Gilles, O. Bravo, C. Vargas, Y. Gomez-Bonilla, G.V. Bingham y D.B. Taylor, "Biology and Trapping of Stable Flies (*Diptera: Muscidae*) Developing in Pineapple Residues (*Ananas comosus*) in Costa Rica," *Journal of Insect Science*, vol. 15, no. 1, p. 145, 2015, doi: 10.1093/jisesa/iev127.

Evaluación del Índice de Calidad de Agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica

Evaluation of the ICA-NSF Water Quality Index in the micro-basins of the Río Dulce National Park as a tool in the comprehensive management of sustainable management, Livingston, Izabal, Guatemala, Central America

José Adiel Robledo-Hernández¹

Fecha de recepción: 6 de junio, 2022


Fecha de aprobación: 23 de setiembre, 2022

Robledo-Hernández, J.A. Evaluación del índice de calidad de agua ICA-NSF en las microcuencas del Parque Nacional Río Dulce como herramienta en la gestión integral del manejo sustentable, Livingston, Izabal, Guatemala, Centroamérica.

Tecnología en Marcha. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023.

Pág. 106-116.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6241>

¹ Estudiante de Programa de Postdoctorado en Ciencias Agrícolas y Ambientales. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Correo electrónico: jarobledoh@profesor.usac.edu.gt
 <https://orcid.org/0000-0002-5529-9826>

Palabras clave

Calidad del agua; recursos hídricos; química del agua; conservación del agua; muestreo del agua; monitoreo del agua.

Resumen

El área protegida denominada Parque Nacional Río Dulce se encuentra ubicada en el nororiente del caribe de Guatemala. Es administrada por el Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP) y regido por un plan maestro. Sin embargo, afronta cada día retos, tales como a) el incremento de desarrollo inmobiliario debido a su belleza escénica, b) el incremento poblacional de las comunidades reconocidas dentro de las diversas zonas del parque y c) vertidos no regularizados de aguas residuales tipos ordinarias y especiales. Ante esta incipiente situación, se hace necesaria la evaluación de la calidad del agua de Río Dulce a través de métodos reconocidos internacionalmente; tal el caso del Índice de Calidad del Agua ICA-NSF, con la finalidad de interpretar los resultados de una manera holística y poder discutirlos en ámbitos académicos, no solo a nivel local, sino internacional. Para ello se georreferenciaron doce estaciones de muestreo en las desembocaduras de los principales tributarios a lo largo del Parque Nacional Río Dulce. Posterior a las colectas de muestras de agua y análisis en laboratorio de los parámetros: coliformes fecales, potencial de hidrógeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fósforo total, temperatura, turbidez, sólidos totales disueltos y oxígeno disuelto, se estimó el ICA-NSF mediante la calculadora en línea del Centro de Investigación del Agua de los Estados Unidos de América. De manera general, considerando la calidad del agua de los afluentes, el ICA-NSF varió entre 71 y 90, lo que se cualifica como una calidad buena. Los parámetros críticos en la disminución del ICA-NSF en las diversas estaciones evaluadas fueron la presencia de coliformes fecales y los sólidos totales disueltos, lo que permite generar lineamientos para el manejo sustentable del Parque Nacional Río Dulce. Se concluye que el agua del Río Dulce no es apta para el consumo humano de forma directa, necesitando de un proceso de potabilización.

Keywords

Water quality; water resources; water chemistry; water conservation; water sampling; water monitoring.

Abstract

The protected area called Río Dulce National Park is located in the northeastern Caribbean region of Guatemala. It is administered by the National Council of Protected Areas (CONAP) and governed by a master plan. However, it faces challenges every day, such as a) the increase in real estate development due to its scenic beauty, b) the population increase of the recognized communities within the various areas of the park, c) non-regularized discharges of ordinary and special wastewater. Given this incipient situation, it is necessary to evaluate the quality of the water in Río Dulce through internationally recognized methods; such is the case of the ICA-NSF Water Quality Index, with the aim of interpreting the results in a holistic manner and being able to discuss them in academic settings, not only locally, but also internationally. For this, twelve sampling stations were georeferenced at the source of the main tributaries along the Río Dulce National Park. After the collection of water samples and laboratory analysis of the parameters: fecal coliforms, hydrogen potential, biochemical oxygen demand, nitrates, total phosphorus, temperature, turbidity, total dissolved solids and dissolved oxygen, the ICA-NSF was estimated using the online calculator from the Water Research Center of the United States of America.

In general, considering the quality of the water of the tributaries, the ICA-NSF varied between 71 and 90, which qualifies as good quality. The critical parameters in the decrease of the ICA-NSF in the various stations evaluated were the presence of fecal coliforms and total dissolved solids, which allows the generation of guidelines for the sustainable management of the Río Dulce National Park. It is concluded that the water of the Río Dulce is not suitable for human consumption directly, requiring a purification process.

Introducción

El estado de la calidad del agua superficial para usos múltiples requiere, sin precedentes, la atención de pobladores, académicos, autoridades locales y regionales. Existen reportes desde las últimas dos décadas, acerca de que el 60% de los sistemas ecológicos del mundo se están degradando y son utilizados en forma no sustentable [1]. La International Lake Environment Committee Foundation indica que el 2% del agua dulce sobre la superficie de la tierra es utilizable y 90% de esa agua se encuentra en lagos y presas [2]. Esto enmarca la situación actual de la disposición de agua a nivel mundial en estados de alarma, en cuanto a su uso racional a corto y mediano plazo. El manejo sustentable de las cuencas hidrológicas y de los microclimas que estas albergan es, sin duda alguna, un baluarte en la preservación del medio ambiente en los países subtropicales de América [3].

Respecto al caribe guatemalteco, debido a su ubicación geográfica en la región tropical del hemisferio norte y fisiografía, es una región rica en recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, sin una época seca definida. Sin embargo, estas oportunidades también generan amenazas, como la baja organización social y estatal, el uso y reúso inadecuado de las fuentes de agua, contaminación incipiente por *E. coli* y ausencia casi total de plantas de tratamiento de aguas de tipo ordinario y especial, entre otras [4].

Varios actores locales y regionales, entre ellos los académicos, unen esfuerzos en pro de un mejor futuro para las próximas generaciones, siendo los académicos a quienes corresponde forjar información confiable, de carácter científico basada en estándares internacionales, para fortalecer la toma de decisiones tendientes al uso sustentable de los recursos hídricos a nivel nacional. Río Dulce, es sin duda, uno de los patrimonios naturales que debe ser monitoreado y evaluado en lo que a su salud respecta.

Actualmente, la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca Hidrográfica del Lago de Izabal y Río Dulce AMASURLI, no cuenta con estaciones de muestreo a lo largo y ancho del Río Dulce [5] [6]. Por esta razón, la presente investigación se focaliza en un vacío estructural del programa de monitoreo de la Subcuenca del Lago de Izabal y Río Dulce, pues durante más de 20 años únicamente se ha monitoreado el lago, sin considerar la importancia de las funciones socio-ambientales del Río Dulce, tales como el equilibrio ecosistémico que genera el mangle y la preservación de la flora y fauna endémica del caribe guatemalteco [7].

Los índices de la calidad del agua son herramientas que permiten la toma de decisiones para reducir el deterioro de la calidad del agua al evaluar de forma directa las variaciones de sus parámetros de calidad [3]. Actualmente existen diferentes metodologías para determinar la calidad del agua, y estas poseen divergencias entre sí al determinar la calidad del agua, por lo que consideraciones profesionales son importantes al momento de interpretar la calidad del agua [8]. La metodología del ICA-NSF es utilizada para determinar la calidad del agua de ríos para consumo humano, usando pesos ponderados en sus parámetros, lo que ha permitido que sea popularizado en muchos países [9].

Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación es la evaluación de la calidad del agua del Parque Nacional Río Dulce de forma anual marzo-2021 a enero-2022, utilizando los parámetros de respuesta integrados a través del método ICA-NSF: coliformes fecales, potencial de hidrógeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitratos, fósforo total, temperatura, turbidez, sólidos totales disueltos y oxígeno disuelto. De esta manera, los resultados de esta investigación permitirán formar equipos de trabajo en el marco de la gestión integral del manejo sustentable del Río Dulce, cuya interpretación se realizará con base a criterios internacionales.

Metodología

Establecimiento de las estaciones de muestreo:

Se constituyeron doce (12) estaciones de muestreo en los principales tributarios a lo largo del Parque Nacional Río Dulce, los que fueron georreferenciados para fines de colecta de muestras de agua y representación gráfica. Asimismo, cada estación indica una desembocadura estratégica de las microcuencas que representan diversos usos de la tierra [10], resaltando que las estaciones de muestreo de Río Frio, Río Bonito y Río Tameja presentan en sus microcuencas más del 50% de cobertura boscosa respectivamente, según puede observarse en la Figura 1.

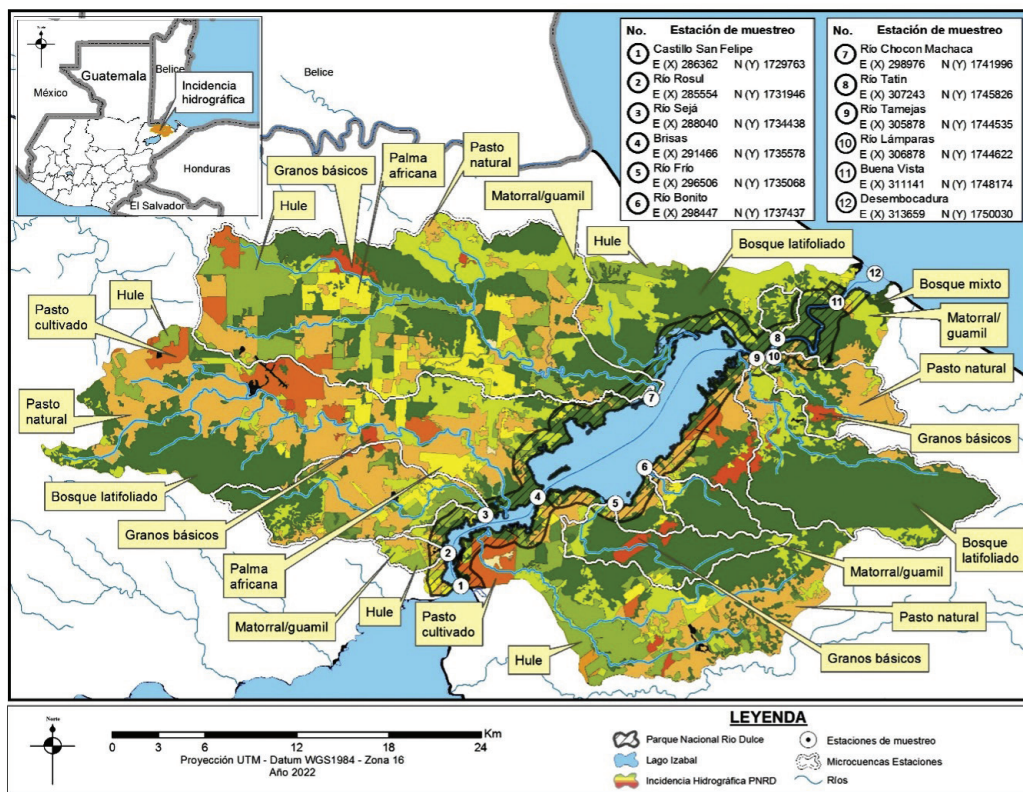


Figura 1. Estaciones de muestreo para evaluar la calidad de agua del Parque Nacional Río Dulce.

La colecta de las muestras de agua:

Se realizó de forma sistemática en cada uno de los puntos georeferenciados para el efecto de forma bimensual de marzo 2021 a enero 2022, las muestras se colectaron a treinta (30) cm de profundidad al centro de los cauces de interés en recipientes esterilizados de un litro de capacidad. Los mismos fueron conducidos en custodia de cadena fría a menos 10°C al laboratorio de análisis de suelos, plantas y aguas de ANACAFE-ANALAB.

Análisis fisicoquímico y microbiológico de la calidad del agua:

Durante las expediciones, también se realizan mediciones *in situ*, de parámetros físicos de la calidad del agua, las cuales se sintetizan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros estimados *in situ*.

Parámetros		Procedimiento
Físicos	Turbidez (-tu)	Con un <i>beaker</i> de 25ml se colectó una muestra de agua que se vertió en un tubo de ensayo que posteriormente se lee en un Turbidímetro Marca Hach, Modelo 2100Q.
	Temperatura (°C)	Para evaluar temperatura, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto y PH, se utilizó una sonda multiparamétrica Marca YSI, Modelo Professional Plus.
	Sólidos totales disueltos (mg/l)	
	Oxígeno disuelto (mg/l)	
Químicos	Potencial de hidrógeno (pH)	

Las muestras trasladadas al laboratorio de análisis de suelos, plantas y aguas de ANACAFE-ANALAB, fueron procesadas para su análisis estimando los parámetros químicos y microbiológicos, resumiendo el proceso según se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Metodologías para análisis de parámetros químicos y microbiológicos de muestras de agua en laboratorio de ANALAB.

Parámetros		Metodología
Químicos	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF. 22nd.ed.2012, Part 5220, 5-16. Determinación por fotometría.
	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅) mg/l	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF. 22nd.ed.2012, Part 5210, 5-04
	Amonio (NH ⁴⁺) mg/l	Spectroquant análogo a EPA 350.1, APHA 4500-NH3 F, ISO 7150-1 y DIN 38406-5
	Nitratos (NO ₃) mg/l	Spectroquant análogo a DIN 38405-9
	Nitritos (NO ₂) mg/l	Spectroquant análogo ISO 8466-1 y DIN 38402 A51
	Fósforo total (mg/l)	Spectroquant análogo a EPA 365.2+3, APHA 4500-P E y DIN EN ISO 6878
Microbiológicos	Coliformes fecales NMP UNFC	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF. 22nd.ed.2012, Part 9221, 9-74/75
	E. coli NMP UNFC	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF. 22nd.ed.2012, Part 9221, 9-74/75

Evaluación del índice de calidad del agua ICA-NSF:

Se estimó el índice de calidad del agua correspondiente a cada una de las doce (12) estaciones de muestreo en forma bimensual durante el período de estudio, según la metodología del National Sanitation Foundation -NSF- de Los Estados Unidos de América, a través del sistema en línea desarrollado por Oram [12] denominado “Calculadora del Water Reserch Center”, el ICA-NSF utiliza un sistema de ponderación sobre los parámetros de estudio, cuadro 3.

Cuadro 3. Factor de ponderación de parámetros en el ICA – NSF

Parámetros	Factor de ponderación
Coliformes fecales (CF)	0.16
Potencial de hidrógeno (pH)	0.11
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	0.11
Nitratos (NO ₃ ⁻¹)	0.10
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	0.10
Temperatura	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos totales disueltos (STD)	0.07
Oxígeno disuelto (OD)	0.17

Fuente: [12]

Para la realización de los cálculos se utiliza un algoritmo de una suma lineal ponderada del efecto de las variables de respuesta y los resultados son expresados en forma numérica entera, en una escala de 0 a 100, según Cuadro 4. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos de cada una de las estaciones de muestreo se ingresaron a dicho sistema, generando un índice de calidad del agua parcial para cada parámetro y posteriormente el índice general de calidad del agua de la estación de interés, con base en el valor numérico del ICA-NSF se procedió a realizar la cualificación correspondiente.

Cuadro 4. Escala cualitativa de clasificación del ICA-NSF

Calidad del agua	Valor del ICA
Excelente	91 – 100
Buena	71 – 90
Media	51 – 70
Mala	26 – 50
Muy mala	0 – 25

Fuente: [13]

Resultados y discusión

Con base en los resultados de los análisis de laboratorio y posterior cálculo de los índices de calidad del agua, tanto parciales como totales, E. coli y sólidos totales disueltos (TDS) son los parámetros críticos de los incrementos decrecientes (Cuadro 5), mismos que no alteran significativamente el índice, el cual aún presentó valores entre 68 y 83, calificando de forma general el agua como de calidad buena (Cuadro 6).

Como puede observarse, el 81% de las estaciones de muestreo indicaron una calidad de agua “buena” destacándose los puntos Río Bonito y Desembocadura, los cuales mantuvieron esa categoría durante todo el período de evaluación, mientras que el 18% indicaron una calidad “media” principalmente Ríos Sejá, Río Chocón Machaca y Río Tameja que presentaron esta categoría en dos ocasiones y el 1% indicó una calidad de agua “excelente” en el punto Castillo San Felipe.

En el mes de julio del año 2021 se presentó el menor valor del ICA-NSF (68) que corresponde a una categoría de calidad media, manifiesta en las estaciones de muestreo Río Rosul, Río Sejá, Brisas, Río Frío, Río Chocón Machaca, Río Tatín y Río Lámpara. Esto se atribuyó a que la mayor cantidad de precipitación en Río Dulce ocurre durante los meses de junio y julio [14], donde los índices parciales de sólidos totales disueltos y turbidez fueron críticos. Esta presencia de sólidos totales disueltos coincide con reportes realizados en el caribe guatemalteco [15], debido a la ausencia de una época seca, bien definida, lluvias constantes y acarreo de sedimentos al Río Dulce. Cabe mencionar que los muestreos realizados en marzo-2021, mayo-2021, noviembre-2021 y enero-2022 mantuvieron una calidad constante en la mayoría de las estaciones de muestreo clasificada como “buena”.

Los resultados de esta investigación permiten generar lineamientos de manejo sustentable en el Parque Nacional Río Dulce considerando que la calidad del agua sufre impactos negativos en demérito por contaminantes fecales (E. coli) y sólidos totales disueltos (TDS). Esto es consecuencia de la falta de tratamiento de aguas residuales previo a su disposición final en el cuerpo de agua, irrespetando el Acuerdo Gubernativo 236-2006, sobre uso y reúso de aguas residuales [16]. Por lo tanto, el agua que fluye por el Lago de Izabal y luego al Río Dulce, no se considera apta para consumo humano, riego de productos de consumo en fresco y agua entubada [6] ya que, para estos fines debe pasar por un proceso de potabilización.

El estado actual de la salud del agua del Parque Nacional Río Dulce se califica como “buena”, lo que indica la bondad del índice respecto a los parámetros evaluados y la dinámica de estos en el ecosistema acuático [17]; al mismo tiempo, ya hay evidencias de la aceptación del ICA-NSF en la evaluación de la calidad del agua en ríos tropicales, en relación con sus normativas [18]. En el caso específico de Parque Nacional Río Dulce, puede tener explicación en dos líneas de pensamiento: la geología e hidrología del Río Dulce y las interacciones socioeconómicas y ambientales de la región del caribe guatemalteco.

Respecto a la primera línea de pensamiento, el Río Cahabón es el principal tributario del Río Polochic, el cual, a su vez, es el principal afluente del lago de Izabal, que drena por completo al Río Dulce y conecta directamente con el Golfo de Honduras en el Mar Caribe, (Figura 1). El tiempo durante el cual el agua fluye a lo largo de la subcuenca del lago de Izabal y Río Dulce es relativamente corto, sugiriendo un tiempo de residencia del agua en el lago de seis (06) meses [19], por lo que existe una alta dinámica del ecosistema acuático del Lago de Izabal y Río Dulce, a través de un flujo renovador de parámetros fisicoquímicos y biológicos, materia orgánica, oxígeno disuelto, etc., en función de covariables ecosistémicas propias del caribe guatemalteco [20].

Respecto a la segunda línea de pensamiento, el Río Dulce está ubicado dentro del área protegida Parque Nacional Río Dulce con una extensión total de 16,590 ha, de las cuales 7,198 ha las ocupa el cuerpo de agua [7]. Para el efecto existe un marco legal metodológico que especifica su conservación y uso sustentable; entre otros, está el Reglamento de zonificación, uso y manejo del área protegida Río Dulce [21] y el Plan Maestro del Parque Nacional Río Dulce [7].

A la fecha se regula el otorgamiento de concesiones y arrendamientos, se trabaja con las comunidades establecidas antes de su declaratoria como área protegida y se forman equilibrios ambientales para preservar la salud del ecosistema Parque Nacional Río Dulce, a través de la educación (eco pedagogía) para niños y adultos, la organización social en comités, y la interacción comunitaria con diferentes instituciones, gubernamentales, no gubernamentales e inversores de buena voluntad. Por último, es importante reconocer el seguimiento a las variaciones temporales y espaciales de la salud del Lago de Izabal, a través de los trabajos realizados por la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce [22] [23].

Cuadro 5. Índice parcial promedio anual de los diferentes parámetros que constituyen el ICA-NSF

Parámetro	Estaciones de muestreo											
	Castillo San Felipe	Río Rosul	Río Sejá	Brisas	Río Frío	Río Bonito	Río Chocón Machaca	Río Tatín	Río Tameja	Río Lámpara	Buena Vista	Desembocadura
OD%	91	79	82	89	78	92	67	83	89	70	90	94
E. coli	71	23	43	57	29	39	48	46	33	41	60	59
pH	80	89	85	81	90	82	86	83	88	88	80	85
DBO	96	87	71	93	85	85	78	89	62	83	89	82
T°	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89	89
Fósforo total	80	80	78	79	80	80	77	80	79	79	79	76
Nitrato	88	86	84	91	89	88	93	94	94	88	95	95
Turbidez	92	85	68	82	81	79	70	86	67	85	89	84
TDS	81	81	81	81	76	78	72	53	79	51	48	30
ICA-NSF Promedio anual	85	74	74	82	75	78	74	77	74	73	80	79

Fuente: Elaboración propia. Clasificación: Excelente (91-100), Buena (71-90), Media (51-70), Mala (26-50), Muy mala (0-25).

Cuadro 6. Índice de Calidad del agua ICA-NSF de las microcuencas que drenan al Río Dulce

No.	Estaciones de muestreo	23/03/2021	13/05/2021	20/07/2021	08/09/2021	03/11/2021	12/01/2022	ICA-NSF Promedio anual
1	Castillo San Felipe	81	85	81	93	83	86	85
2	Río Rosul	71	83	63	75	80	74	74
3	Río Sejá	81	83	51	80	86	63	74
4	Brisas	87	84	68	85	87	78	82
5	Río Frío	74	73	70	78	80	73	75
6	Río Bonito	78	77	71	77	86	77	78
7	Río Chocón Machaca	78	76	56	90	82	59	74
8	Río Tatín	71	80	68	82	84	78	77
9	Río Tameja	76	83	71	84	70	60	74
10	Río Lámpara	71	75	62	83	78	70	73
11	Buena Vista	70	81	80	85	83	81	80
12	Desembocadura	79	79	75	82	78	78	79
ICA-NSF promedio por muestreo		76	80	68	83	81	73	77

Fuente: Elaboración propia. Clasificación: Excelente (91-100), Buena (71-90), Media (51-70), Mala (26-50), Muy mala (0-25).

Conclusiones

La calidad del agua es función de los índices totales y parciales; en este último caso, los valores críticos son aportados por E. coli y sólidos totales disueltos.

La cualificación del agua según el índice de calidad del agua ICA-NSF de marzo 2021 a enero 2022 indica que el 81% de las estaciones de muestreo presenta calidad buena, el 18% media y el 1% excelente.

La calidad del agua no es apta para el consumo humano de forma directa, haciéndose necesario un proceso de potabilización.

El Parque Nacional Río Dulce es un área protegida importante para Guatemala, cuyo estado de salud no percibe mejoras, a no ser que se implementen leyes ambientales para su manejo sustentable, tal el caso del Acuerdo Gubernativo 236-2006 sobre el vertido de aguas residuales y manejo de lodos.

Recomendaciones

La implementación de un sistema de monitoreo en los afluentes de descargas de aguas residuales, para evaluar la contaminación y estado de resiliencia del río en función de los usos actuales y potenciales de la tierra.

El establecimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales y la recuperación de áreas con vocación forestal, para la mejora de la calidad del agua del río.

El fomento de programas de educación ambiental dirigidos a las poblaciones con influencia directa en el Parque Nacional Río Dulce, con el fin de promover su conservación.

Agradecimiento

Sincero agradecimiento a la Universidad de San Carlos de Guatemala y a los estudiantes de la Maestría en Desarrollo Rural y Cambio Climático del Centro Universitario de Izabal, por ser parte del equipo de investigación y desarrollo de trabajos de campo.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud-OMS. "Ecosistemas y bienestar humano: síntesis de salud." Un informe de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. 2005.
- [2] International Lake Environment Committee Foundation-ILEC. Implementing the world lake vision for the sustainable use of lake and reservoirs. World lake vision action report. 2007.
- [3] P. Torres, et al. "Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una Revisión Crítica." *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 79–94. 2009.
- [4] M. Basterrechea, & A. Guerra. "Recursos hídricos". En Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. Editorial Universitaria UVG, 2019, pp. 86–107.
- [5] M. R. Aguirre Cordón, et al., "Evaluación Del Estado Trófico Del Lago de Izabal, Guatemala." *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.*, vol. 25, no. 1, pp. 28–31, 2016.
- [6] M. R. Aguirre Cordón, et al., "Aplicación del Índice de Calidad del Agua (ICA)." Caso de estudio: Lago de Izabal, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.*, vol. 25, no. 2, pp. 39-43, 2016.
- [7] Consejo Nacional de áreas protegidas- CONAP. "Plan Maestro Parque Nacional Río Dulce, Segunda Actualización." Consejo Nacional de Areas Protegidas -CONAP-, 2019. Izabal, Guatemala. GT.
- [8] L. I. Pérez, et al., "Análisis Comparativo de Índices de Calidad del Agua Aplicados al Río Ranchería, La Guajira-Colombia" *Información tecnológica.*, vol.29, no. 3, pp. 47-58. 2018. doi.org/10.4067/S0718-07642018000300047
- [9] A. D. Studian, et al., "Development of river water quality indices-a review". *Environmental Monitoring and Assessment.*, vol 188, no. 58, 2016. doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0
- [10] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA. "Determinación de la Cobertura Vegetal y Uso de la Tierra a Escala 1:50,000 de la República de Guatemala, Año 2,020." Memoria técnica, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA., 2021.
- [11] Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de ANACAFE -ANALAB. Informe de análisis de agua. Asociación Nacional del Café. ANACAFE, Guatemala. 2022.
- [12] B. Oram. (2022, mayo 22). *Water Quality Index Calculator for Surface Water. Water Research Center: Monitoring the Quality of Surfacewaters*, [en línea]. Disponible en: <https://www.knowyourh2o.com/outdoor-3/water-quality-index-calculator-for-surface-water>.
- [13] L. S. Quiroz Fernández, et al. "Aplicación del índice de Calidad de Agua en el río Portoviejo, Ecuador." *Ingeniería Hidráulica y Ambiental.*, vol. 38, no. 3, pp. 41–51. 2017.
- [14] Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -INSIVUHME. "Precipitación promedio mensual de la estación las Vegas, Livingston, Izabal": Serie histórica años 2010 a 2020. 2022. Guatemala, GT.
- [15] F. G. Nordlie, "Final report to the Organization for Tropical Studies," Inc., University of Florida. 1970.
- [16] Presidencia de la República. "Reglamento de las Descargas y Reúso de Aguas Residuales y Disposición de lodos." Acuerdo Gubernativo Número 236-2006. Guatemala.
- [17] M. Castro, et al. "Indicadores De La Calidad Del Agua: Evolución y Tendencias a Nivel Global." *Ingeniería Solidaria.* vol 10, no. 17, pp. 111–24. 2014. doi:10.16925/in.v9i17.811.
- [18] J. García-González, et al. "Determinación del índice de calidad del agua en ríos de Santo Domingo de Los Tsáchilas, Ecuador." *Ingeniería del agua.*, vol. 26, no. 1, pp. 115–26. 2022. doi:10.4995/la.2021.13921.
- [19] M.M. Brinson, & G. Nordlie, "Lake Izabal, Guatemala. Verhandlungen Internationale Vereinigung fur Theoretische Undhangelwandre." *Limnology.*, vol. 19, pp. 1468 -1479. 1975.

- [20] H. K. Brooks, "A preliminary report on Lake Izabal Geology-Hydrology". A report to the Organization for Tropical Studies, Inc., University of Florida. 1970.
- [21] Presidencia de la República. "Reglamento de zonificación, uso y manejo del área protegida Río Dulce." Acuerdo Gubernativo Número 182-1993. Guatemala.
- [22] Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce, Fundación Defensores de la Naturaleza & The Natural Conservancy. "Agenda de Conservación de la Cuenca del Lago de Izabal y Río Dulce". Guatemala: MARN. 2006.
- [23] J. Robledo, et al. "La calidad del agua del Lago de Izabal, Guatemala. Relaciones temporales y espaciales de variables físico-químicas y biológicas." *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.*, vol. 23, no. 4, pp. 28-32. 2014.

Desarrollo del ciclo de vida y comparación de la fertilidad de *Estigmene albida* aislada del cultivo del higo (*Ficus carica*), bajo condiciones controladas de laboratorio

Life cycle development and comparison of the fertility of *Estigmene albida* isolated from fig crop (*Ficus carica*), under controlled laboratory conditions



Alexander Schmidt-Durán¹, Randall Chacón-Cerdas²

Fecha de recepción: 27 de setiembre, 2021

Fecha de aprobación: 16 de marzo, 2022

Schmidt-Durán, A., Chacón-Cerdas, R. Desarrollo del ciclo de vida y comparación de la fertilidad de *Estigmene albida* aislada del cultivo del higo (*Ficus carica*), bajo condiciones controladas de laboratorio. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 117-129.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5884>

- 1 Centro de Investigación en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: aschmidt@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1061-6840>
- 2 Centro de Investigación en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rchacon@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5364-4649>

Palabras clave

Estigmene albida; higo; ciclo de vida; fertilidad; *Carcelia* sp.

Resumen

Los lepidópteros son uno de los grupos de organismos más grandes que existen, conocidos comúnmente como mariposas o polillas, los cuales en su estado larval son considerados como las plagas más dañinas en la agricultura. Larvas de lepidópteros fueron colectados del cultivo del higo y trasladadas bajo condiciones ambientales controladas y alimentadas bajo una dieta artificial. Se realizó una identificación de las larvas colectadas, así como la determinación de su ciclo de vida. Además, se determinó la fertilidad y eclosión de los huevos que ovipositaban los adultos en parejas. Se identificó al lepidóptero como *Estigmene albida*, insecto perteneciente a la superfamilia Noctuidae, familia Erebidae, el cual cuenta con poca información reportada en la literatura. El ciclo de vida consistió en 57 días, desarrollando cinco estadios larvales con características similares a las reportadas para *E. acrea*, especie del mismo género y de mayor importancia como plaga agrícola. En promedio, las hembras que copularon y produjeron huevos viables pusieron 377,4 huevos por hembra, de los cuales se desarrollaron 222,4 larvas por hembra, siendo estos resultados menores a los reportados para *E. acrea*, pudiendo estas variables ser afectadas por la alimentación, la temperatura y la especie con la que se trabaja. Además, se logró colectar larvas de *E. albida* parasitadas por un taquinido identificado como *Carcelia* sp. En conclusión, este artículo brinda uno de los primeros reportes de *E. albida* atacando cultivos agrícolas y brinda información sobre su ciclo de vida y fertilidad. Además, es el primer reporte de este insecto atacando el cultivo del higo y de *Carcelia* sp. parasitando larvas de este lepidóptero.

Keywords

Estigmene albida; fig; life cycle; fertility; *Carcelia* sp.

Abstract

Lepidoptera is one of the largest groups of organisms, known commonly as butterflies or moths, which in their larval state, are considered the most harmful agricultural plagues. Lepidoptera larvae were collected from a fig crop, transferred under controlled environmental conditions, and fed an artificial diet. An identification of the larvae collected was performed, as well as the determination of their life cycle. Additionally, the fertility and egg hatching rate were determined from the eggs laid by the adults placed in couples. The lepidopteran species was identified as *Estigmene albida*, an insect from the Noctuidae superfamily, Erebidae family, and with very few information reported in the literature to date. The life cycle consisted of 57 days, developing 5 larval stages, with similar characteristics to those reported for *E. acrea*, a species from the same genus with more known importance as a crop plague. On average, the females that mated and laid viable eggs, placed 377.4 eggs, from which 222.4 per female developed larvae. These results were less than those reported for *E. acrea*; however, these variables could have been affected by the diet, the temperature and the species worked with. Also, it was possible to collect larvae from *E. albida* parasited with the tachinidae *Carcelia* sp. In conclusion, this study provides one of the first reports of *E. albida* affecting crops and provides information of their life cycle and fertility. It is also the first report of this insect affecting specifically a fig crop and of *Carcelia* sp. parasiting larvae of this lepidoptera.

Introducción

Los lepidópteros son uno de los grupos de organismos más grandes que existen, conocidos comúnmente como mariposas y polillas. Son importantes objeto de estudio debido a que muchas especies son plagas de importancia económica en la agricultura. Se estima que este orden posee aproximadamente 157 424 especies incluyendo 22 especies fósiles clasificadas en 45 superfamilias, 134 familias y 15 562 géneros, siendo el segundo grupo más diverso de animales que existen, después del Coleóptera [1] por lo que muchas de éstas todavía no han sido estudiadas. En Costa Rica habitan más de 12 000 especies diferentes de lepidópteros [2].

Los lepidópteros presentan una metamorfosis completa, con alas membranosas cubiertas de escamas [2]. La mayoría de los lepidópteros en su estado larval se alimentan de las plantas, mientras que en su estado adulto se alimentan del néctar de las flores, siendo muy importantes en los ecosistemas debido a su función como herbívoros, al ser uno de los grupos de plagas más dañinos en la agricultura; así también como polinizadores, debido a sus hábitos de alimentación en su estado adulto y como presa de otros insectos [3].

Noctuidae contiene alrededor de 42 400 especies y es la superfamilia más grande dentro de lepidóptera [4]. Se caracteriza porque sus ejemplares poseen hábitos nocturnos y son atraídos por la luz, la mayoría son polívoros y se alimentan de hojas, no obstante, algunas otras especies atacan órganos como los frutos o los tallos [5]. [6] determinó que más de 6000 especies de lepidóptera son de importancia económica como plagas de cultivos agrícolas, muchas de las cuales se ubican dentro de la superfamilia Noctuidae.

La familia Erebidae (anteriormente denominada Arctiidae) está dentro de la superfamilia Noctuidae, el cual incluye pocas especies plagas de cultivos, los cuales producen daños localizados y con una periodicidad baja. Las larvas de Erebidae son muy peludas, cilíndricas y gruesas; mientras que los adultos tienen un tamaño mediano a grande, con colores mayoritariamente negros o blancos con franjas de color o manchas, los cuales presentan un cuerpo de delgado a robusto y alas enteras donde las posteriores son notablemente más pequeñas que las anteriores [2].

Estigmene albida es un lepidóptero perteneciente a la familia Erebidae, el cual se encuentra distribuido en América. Posee un hábitat que se ubica principalmente en Estados Unidos, donde se encuentra en lugares como Idaho, Montana, Arizona, Nuevo México, el oeste de Dakota del Sur y el sureste de California, así como gran parte de México [7]. El Servicio de Información sobre Biodiversidad Global (GBIF, por sus siglas en inglés), localiza a este insecto principalmente en Estados Unidos, sin embargo, menciona a Costa Rica como el segundo país con más reportes de aparición [8]. Sin embargo, la información disponible para *E. albida* es escasa a nivel mundial.

Es por esta razón, que este estudio realizó una comparación de los resultados obtenidos de *E. albida* con la especie *Estigmene acrea*, uno de los ejemplares más importantes de esta familia y que pertenece al mismo género que el lepidóptero en estudio. Se han realizado varios reportes de *E. acrea* como insecto plaga de importancia económica atacando más de 60 especies de plantas diferentes [9], siendo los arvenses de hoja ancha los hospederos más comunes [10] como *Amaranthus* sp. y *Malva* sp. [11], sin embargo, esta plaga puede expandir su rango de acción y atacar a cultivos como el maíz, el algodón, la soya, la remolacha azucarera [10], el frijol, el tabaco y diferentes hortalizas [11].

El higo (*Ficus carica*) es un cultivo mediterráneo de importancia económica debido a su fruto y calidad nutricional. En Costa Rica el higo se cultiva principalmente en la zona Norte de Cartago [12], en donde hay reportes del gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*) atacando este cultivo [13], sin embargo, la mayoría de plagas de importancia en este cultivo no están

presentes en Costa Rica, e incluso, algunas de ellas, a nivel fitosanitario son catalogadas como plagas cuarentenarias para este cultivo, como la cochinilla rosada (*Maconellicoccus hirsutus*) y la cochinilla de la higuera (*Ceroplastes rusci*) [14], lo que demuestra que existe poca información referente a las plagas que pueden atacar a este cultivo en el trópico y en Costa Rica.

Este artículo brinda uno de los primeros reportes de *Estigmene albida* como insecto atacando cultivos agrícolas de interés comercial y el primer reporte de este insecto atacando el cultivo del higo (*Ficus carica*) en Costa Rica. Es por esta razón, que el objetivo de este estudio fue determinar el ciclo de vida y comparar la fertilidad de *Estigmene albida* bajo condiciones controladas de laboratorio aisladas en el cultivo del higo (*Ficus carica*), así como la identificación de un parasitoide asociado a éste, como potencial agente biocontrolador.

Materiales y Métodos

Colecta del material

Hojas con larvas de insectos fueron colectadas de una plantación de higo (*Ficus carica*) ubicada en el Campo Frutícola del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB) ubicado en Cartago, en las coordenadas 09° 51' 09.1" (± 5) latitud norte y 083° 54' 25.4" (± 5) longitud oeste el cual se encuentra a 1405 msnm. Las hojas fueron transportadas al Laboratorio de Biocontrol del CIB perteneciente al Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cada larva presente en las hojas fue individualizada en contenedores de plástico con un volumen de 60 ml bajo condiciones ambientales controladas por medio de una cámara climática, con una temperatura de $24 \pm 0,1$ °C, una humedad relativa del $70 \pm 0,5$ % y un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad.

Descripción del ciclo de vida e identificación del lepidóptero

Cada larva individualizada fue alimentada mediante un segmento aproximado de 1 cm² con la dieta artificial BIO-MIX H-89 modificada [15] y bajo las condiciones ambientales controladas descritas anteriormente. Cada dos días el alimento fue reemplazado y los envases con las larvas fueron cambiados por envases nuevos con el fin de limpiar los excrementos generados, hasta completar su desarrollo larval.

Posteriormente, cuando las larvas se transformaron en pupas, éstas fueron trasladadas a envases nuevos bajo las mismas condiciones ambientales controladas, en ausencia de alimento hasta que el adulto emergiera. Diez individuos adultos fueron colocados en bolsas de papel de 4000 cm³ con el fin de favorecer la copulación de los mismos. A cada bolsa se le colocó una mota de algodón de aproximadamente 40 ml de volumen impregnado con una solución de agua y miel en una proporción 1:1, como reemplazo del néctar de las flores. El algodón fue reemplazado cada 4 días de las bolsas de papel.

A partir de las 48 h, las masas de huevos obtenidas en las bolsas de pared fueron recuperadas e individualizadas en recipientes de plástico de 60 ml, repitiendo esta actividad hasta la muerte de los adultos. Las masas de huevos se mantuvieron en los recipientes hasta su eclosión, momento en el cual se volvieron a individualizar, repitiendo el proceso de crianza de las larvas nuevamente.

Se determinó la duración de cada etapa de desarrollo para cada individuo, desde su fase de huevo hasta la adultez con el fin de establecer su ciclo de vida, detallando en los diferentes estadios larvales. Por último, cuando el ciclo de vida estaba establecido, los insectos adultos fueron identificados por el taxónomo especialista en lepidópteros Ing. José Joaquín Montero Ramírez. Todos los resultados obtenidos fueron comparados con datos reportados para *E. acraea*.

Determinación de la fertilidad y eclosión

Luego de completar el ciclo de vida, un adulto macho y una hembra fueron colocados en una bolsa de papel (4000 cm³) bajo las mismas condiciones ambientales controladas, repitiendo el procedimiento hasta obtener 44 parejas individualizadas. Se registraron las siguientes variables para cada pareja:

1. N inicial
2. Porcentaje de hembras que ovipositan
3. Promedio de días para primera oviposición/hembra
4. Promedio de huevos/hembra
5. Promedio de larvas/hembra
6. Porcentaje de Hembras con Posturas Viabiles (HPV):
 - Promedio de días para primera oviposición/HPV
 - Promedio de huevos/HPV
 - Promedio de larvas/HPV
 - Porcentaje promedio de viabilidad de huevos
 - Promedio de días para eclosión/HPV

Estas mismas variables se evaluaron en seis hembras individualizadas para estudiar la incidencia de partenogénesis en la especie. Además, se compararon algunas de las variables anteriores según tipo de reproducción (sexual y partenogénesis) mediante pruebas inferenciales, según los datos cumplieran con los supuestos estadísticos de normalidad y homocedasticidad. La normalidad de los datos se evaluó mediante las pruebas de Anderson-Darling, Ryan-Joiner o Kolmogorov-Smirnov; mientras que la homocedasticidad se evaluó con la prueba de Levene. Todos los análisis se realizaron asumiendo un valor $\alpha = 0,050$ mediante el programa Minitab® [16].

Además, se aplicó la correlación lineal de Spearman para evaluar la relación de dependencia entre la cantidad de huevos por pareja, los días para la primera oviposición y la cantidad de larvas eclosionadas para las hembras en apareamiento que produjeron huevos. Posteriormente, se analizó la dependencia entre la cantidad de larvas y el tiempo de eclosión para los casos en que se registró eclosión producto de HPV. Todos los análisis se realizaron asumiendo un valor de $\alpha = 0,050$ mediante el programa Minitab® [16]. Todos los resultados obtenidos fueron comparados con datos reportados para *E. acrea*.

Aislamiento e identificación de parasitoide

De la colecta de insectos que se realizó desde el Campo Frutícola, tres larvas presentaron síntomas de parasitismo por otro insecto, debido a su baja movilidad, falta de alimentación e hinchazón. Las larvas fueron manipuladas de la misma forma que las demás, sin embargo, fueron colocadas en envases plásticos de 500 ml y monitoreadas diariamente. Al día siguiente de la muerte de las larvas, se observó la generación de un capullo alrededor de la misma el cual contenía de 3 a 4 pupas, esto ocurrió bajo las mismas condiciones ambientales controladas. Al emerger los adultos, estos fueron llevados para su identificación por el taxónomo especialista en dípteros Dr. Manuel Zumbado Arrieta.

Resultados y discusión

Descripción del ciclo de vida e identificación del lepidóptero

El lepidóptero fue identificado como *Estigmene albida*, una polilla de la superfamilia Noctuidae, familia Erebidae. El ciclo de vida de *E. albida* se estableció en 57 días totales bajo condiciones controladas de laboratorio (Figura 1). Para *E. acrea* se ha establecido que el ciclo de vida dura, en promedio, entre 35 a 42 días en condiciones ambientales [17], por lo que *E. albida* presenta un ciclo de vida 15 días mayor en condiciones controladas de laboratorio que el reportado para *E. acrea*, sin embargo, el mismo autor también reporta que en estado larval puede llegar a durar hasta 45 días, razón por la cual, se estima que el rango del ciclo de vida puede ser ampliado, dependiendo de las condiciones ambientales y del régimen de alimentación en el que se encuentren los insectos.

E. albida presentó huevos esféricos ovipositados en grupos que, en promedio, eran de 376 huevos por hembra, los cuales recién puestos eran de color amarillo, pero luego cambiaban a un color blanco-grisáceo, los cuales eclosionaban luego de 5 días. *E. acrea* presenta huevos esféricos que miden aproximadamente 0,6 mm, los cuales inicialmente son amarillos, pero luego cambian a un color grisáceo. Las hembras producen aproximadamente entre 400 a 1000 huevos, los cuales eclosionan después de 4 a 5 días [17]. En general, el tiempo de eclosión de los huevos en ambas especies es similar, sin embargo, bajo condiciones de laboratorio, el promedio de huevos puesto por cada hembra en *E. albida* es inferior al reportado para *E. acrea*, el cual puede deberse a las condiciones limitadas de espacio en las que se encuentran los adultos en las bolsas de papel o a diferencias propias de cada especie.

E. albida presentó 5 estadios larvales (figura 2). El primer estadio se caracterizó por larvas de color amarillo pálido, con pelos corporales finos de color negro. Al iniciar el segundo estadio larval, las larvas aumentaron la cantidad de pelos corporales y estos variaban de color marrón, café y negro, además presentaron una franja longitudinal de color amarillo o blanco. El tercer instar se caracterizó por un oscurecimiento de la larva y de los pelos corporales, evidenciándose todavía la franja longitudinal. Para el cuarto estadio larval, los pelos corporales son de color negro en la parte superior y marrón en la parte inferior, manteniendo este mismo patrón en el quinto estadio, solo que la larva es predominantemente negra y de mayor tamaño, durando 26 días en total en la fase larval. En general, en todos los estadios, la larva se alimentaba vorazmente del alimento artificial, aumentando su consumo conforme incrementaba de tamaño.

Las larvas de *E. acrea* presentan de 5 a 7 instares. Al emerger, las larvas miden aproximadamente 2 mm, son de color amarillo pálido hasta carmelita oscuro o marrón y son gregarias hasta alcanzar una longitud de 10 mm, además presentan largos pelos o setas. Al empezar el segundo instar, se observan franjas longitudinales generalmente de color marrón, castaño, amarillo y blanco; los pelos corporales se vuelven más negros, alcanzando una longitud de 15 mm, incrementan su movilidad y desarrollan mandíbulas fuertes. En el tercer instar, las larvas se oscurecen y alcanzan tamaños de hasta 30 mm. Esta apariencia se mantiene en el cuarto y quinto instar, alcanzando tamaños de hasta 45 y 55 mm respectivamente, aumentando su movilidad y voracidad. Se han dado reportes que el estado larval de *E. acrea* puede durar entre 20 hasta los 45 días [17] [18]. En general, los estadios larvales de *E. acrea* y *E. albida* son similares entre sí, tanto en su descripción como en la duración de la fase.

Al empezar la fase de pupa, *E. albida* formó un capullo de seda fino, los cuales se podían ubicar en la tapa o en la base de los envases plásticos, sin embargo, después de 8 días, el capullo se iba abriendo y quedaba únicamente la pupa desnuda, la cual es una pupa obtecta de color café oscuro, durando en total 16 días en esta fase. En cuanto a *E. acrea*, la pupa es de color marrón oscuro y se encuentran generalmente en el suelo en un capullo formado por pelos sedosos y los

pelos corporales de la larva. Esta etapa dura entre 12 a 14 días [17], alcanzando una longitud de 32 mm [18], por lo que se evidencia un aumento del tiempo que *E. albida* requiere en la fase pupal, la cual puede deberse a las condiciones ambientales controladas a las que estaba o por las características propias de esta especie. Además, el capullo formado por *E. albida*, al encontrarse en condiciones controladas tiende a desaparecer conforme avance la fase pupal, característica que no pasa en el ambiente para *E. acrea*.

Por último, los adultos de *E. albida* presentaron una coloración mayoritariamente blanca, con pocas manchas irregulares en las alas o en los bordes de ésta, presentando algunas una ausencia total de las mismas. Los machos eran más pequeños que las hembras y sus alas traseras eran de color ligeramente crema, característica no observada en las hembras. Los segmentos abdominales son de un color amarillo con manchas negras dorsalmente. Los adultos produjeron masas de huevos después de, en promedio, 48 h desde que se colocaban juntos, duración similar a lo reportado para *E. acrea*.

Los adultos de *E. acrea* son polillas que miden entre 3,5 a 4,5 cm de envergadura. Son predominantemente blancas con alas con pequeñas e irregulares manchas negras. Las alas traseras son amarillas en los machos y blancas en las hembras, presentando un dimorfismo sexual. Los segmentos abdominales son mayoritariamente amarillos y llevan una serie de manchas negras dorsalmente en los pleuritos y en los esternitos. Un día después de la emergencia del adulto ocurre la copulación, y luego de esta, 24 h después ocurre la deposición de huevos. Las hembras pueden vivir de 4 a 5 días y pueden poner más de un grupo de huevos [17] [18].



Figura 1. Ciclo de vida de *Estigmene albida* bajo condiciones ambientales controladas.

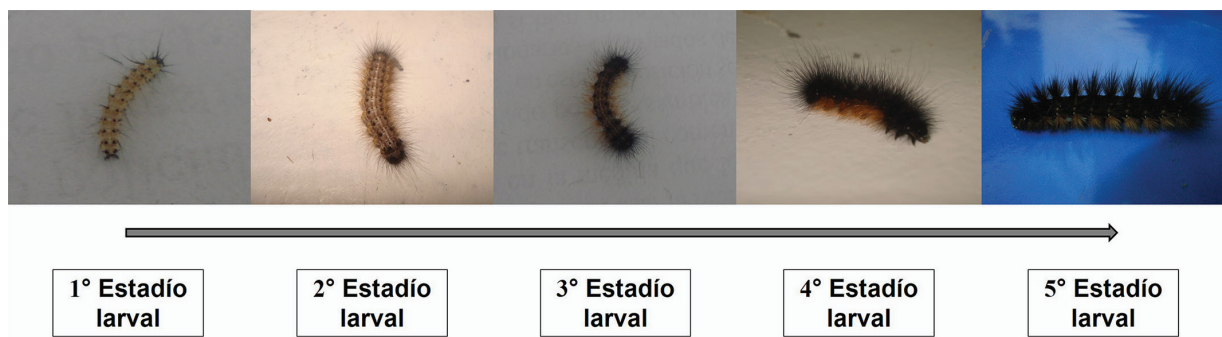


Figura 2. Estadios larvales de *Estigmene albida* bajo condiciones ambientales controladas.

Determinación de la fertilidad y eclosión

En el cuadro 1 se presenta el resumen de las variables en estudio relacionadas con la fertilidad y la eclosión en la especie *E. albida*.

Cuadro 1. Resumen de las variables asociadas con fertilidad y eclosión en *E. albida*.

Variable	Tipo de reproducción		Valor p
	Sexual	Partenogénesis	
1. n inicial = hembras en evaluación	44	6	---
2. % de hembras que ovipositaron	65,9 (29 de 44)	83,3 (5 de 6)	---
3. Promedio de días para primera oviposición/hembra	3,2 ± 2,1 2,0 (mediana)	4,6 ± 3,8 (5 mediana)	p>0,0501
4. Promedio de huevos/hembra	375,4 ± 129,4	324,2 ± 103,8	p>0,0502
5. Promedio de larvas/hembra	38,3 ± 109,0 0,0 (mediana)	0,0 0,0 (mediana)	p>0,0503
6. % de Hembras con Posturas Viables (HPV)	17,2 (5 de 29)	0,0 (0 de 6)	---
6.1 Promedio de días para primera oviposición/HPV	2,0 ± 0,0	---	---
6.2 Promedio de huevos/HPV	377,4 ± 100,2	---	---
6.3 Promedio de larvas/HPV	222,4 ± 179,0	---	---
6.4 % promedio de viabilidad de huevos	59,0	---	---
6.5 Promedio de días para eclosión/HPV	6,0 ± 2,2	---	---

¹ Prueba *t-student* para 2 muestras independientes (medias) y Prueba Mann Whitney U (medianas).

² Prueba *t-student* para 2 muestras independientes (medias).

³ Prueba *t-student* para una muestra (media) y Prueba de Wilcoxon de una muestra (mediana).

Las medianas se calcularon y analizaron para aquellas variables que no cumplieron algún supuesto estadístico.

A partir de los resultados del cuadro 1 se puede observar que las hembras partenogénicas ovipositaron en mayor proporción (83,5%) que las hembras del grupo de apareamiento (65,9%). Sin embargo, para el caso de las variables analizadas estadísticamente entre los dos tipos de reproducción: el promedio de días para la primera oviposición/hembra (variable 2), el promedio de huevos/hembra (variable 3) y el promedio de larvas/hembra (variable 4); no se encontraron diferencias significativas entre sus valores promedio ni entre las medianas, según la prueba correspondiente. Lo anterior muestra evidencia de que la cantidad de huevos y el tiempo promedio en que una hembra adulta de *E. albida* oviposita por primera vez, no dependen de la cópula previa en esta especie. Diferencias entre los dos tipos de reproducción analizadas en diversos invertebrados han señalado que la reproducción sexual predomina ante la escasez de recursos o cuando se requieren múltiples genotipos para la explotación más eficiente de los recursos; mientras que la reproducción sin fecundación se favorece cuando los recursos están más disponibles según las estaciones del año, generalmente cuando se requiere más cantidad de individuos de un solo genotipo para explotar recursos específicos [19].

Investigaciones realizadas en *Estigmene acrea* sobre los factores que influyen en la reproducción han determinado que el tipo de dieta tiene influencia directa sobre la cantidad de oviposición y el tiempo de postura, así como sobre la sobrevivencia de las hembras [20], las cuales ovipositan mayor cantidad de huevos de forma temprana cuando se alimentan de material vegetal en comparación con una dieta sin material fresco, y viven en promedio dos días

más (9 días). En esa investigación encontraron que la cantidad de huevos promedio por hembra se encontraba entre 548 para la reproducción sexual y 429 para la partenogénica, siendo estadísticamente mayor cuando se alimenta de material vegetal fresco, así como un tiempo para la primera oviposición que varía entre 3,30 y 4,66 días siguiendo esa misma relación. En nuestro caso, el pie de cría se alimentó con dieta formulada y el promedio registrado de 376 (sexual) - 325 (partenogénica) huevos por hembra y 3,2 (sexual) - 4,6 (partenogénica) días para la primera oviposición, resultados que se asemejan al reportado para *E. acrea*, a pesar de que en este estudio se utilizó una dieta modificada y no material fresco.

Por otro lado, el apareamiento demostró ser el tipo de reproducción efectiva para producir huevos viables que eclosionen en larvas, representado por un 17,2 % de hembras que lograron descendencia; mientras que ninguna hembra partenogénica produjo larvas. Según el modelo propuesto por [19], la reproducción sexual predomina en invertebrados cuando responde a estrategias de supervivencia que requieren múltiples genotipos para la explotación de recursos. Dentro de las primeras evidencias sobre la fertilidad de especies relacionadas, [21] demostraron que el porcentaje de huevos viables en la especie *E. acrea* es variable entre las diferentes generaciones, siendo un $48,0 \pm 14,0$ % para la F1, donde los factores como la dieta, la transferencia de adultos a nuevos criaderos y los pequeños periodos sin alimento pueden afectar la producción de huevos viables.

En otra investigación, también se asoció el éxito en la reproducción con la alimentación de los machos, los cuales mejoran la fertilidad cuando se alimentan de material vegetal fresco por la influencia de alcaloides pirrolizidínicos de las hojas sobre el desarrollo de la coremata [22]. La variación de la temperatura también tiene una influencia importante en la fertilidad de *E. acrea*, según la investigación realizada por [23], temperaturas de 25°C alcanzan un 66% de eclosión, sin embargo, al incrementarse la temperatura a 35-40°C y las horas de exposición, la variación de dicho porcentaje es considerable (74-0% de eclosión). También, la variación de la temperatura combinada con diferentes regímenes de humedad relativa (10-60%) provocan alteraciones en el porcentaje de eclosión de los huevos en *E. acrea*, ya que conforme las condiciones se vuelven estresantes se disminuye la eclosión exitosa [24]. Además, [25] describieron también la sensibilidad de *E. acrea* al incremento de la temperatura y cómo este factor afecta la cantidad y duración de los estadios. Sin embargo, nuestro experimento controló estos factores para evitar presión adicional sobre la eclosión de las larvas y encontramos que el porcentaje de eclosión de huevos viables es menor en *E. albida* comparado con lo reportado para *E. acrea*.

En cuanto al promedio de larvas por hembra (variable 5) registrado solo para la reproducción sexual, su valor alcanzó 38,3 individuos pero presentó una variación importante de $\pm 109,0$ individuos, lo cual provocó que no existiera diferencia significativa ($p > 0,050$) al comparar esta serie de datos con 0,0 de eclosión de larvas provenientes de hembras partenogénicas; sin embargo, esta condición de 0,0 % de huevos viables en las hembras partenogénicas se debe verificar con un estudio posterior utilizando mayor cantidad de individuos para definir la incidencia del fenómeno de partenogénesis en *E. albida*, ya que este dato no está actualmente disponible en investigaciones previas.

Las variables analizadas sobre las HPV sugieren un tiempo promedio de eclosión de $6,0 \pm 2,2$ días posterior a la postura. El 59 % de sus huevos fueron viables y produjeron 223 larvas en promedio por hembra en su primer ciclo de reproducción. No obstante, la desviación estándar calculada fue también alta para estas variables asociadas con la fertilidad.

Por otro lado, el análisis de Anderson Darling encontró que algunas series de datos para la matriz de correlaciones no presentaban distribución normal ($p < 0,050$) y se seleccionó entonces la prueba de Spearman para determinar la relación lineal entre las variables en estudio.

De las 44 parejas de insectos que se monitorearon se obtuvo postura de huevos en solo 29 de los casos (representa el 65,9 %). A partir del análisis de estas 29 parejas se encontró que existe correlación lineal significativa ($p < 0,050$) solo para las variables Larvas y Primera oviposición, donde eclosionan menor número de larvas conforme la oviposición de los huevos ocurra luego de los primeros dos días de la reunión de la pareja. El coeficiente ρ obtenido $-0,411$ indica la magnitud y la dirección de esta relación (figura 3a). Para las variables de Huevos y Primera oviposición los coeficientes obtenidos fueron positivos, sin embargo, no representaron una relación lineal significativa entre ellas (figura 3b y 3c). Se obtuvo también relación no significativa para Huevos y Larvas, en contraste con otras investigaciones en lepidópteros donde generalmente estas variables se han encontrado relacionadas [13].

De las 29 parejas que ovipositaron, solo en 5 de los casos se obtuvo eclosión de larvas (representa el 17,2 %). Estos datos se analizaron también para la correlación lineal de Spearman encontrando un coeficiente negativo, pero no significativo (figura 3d).

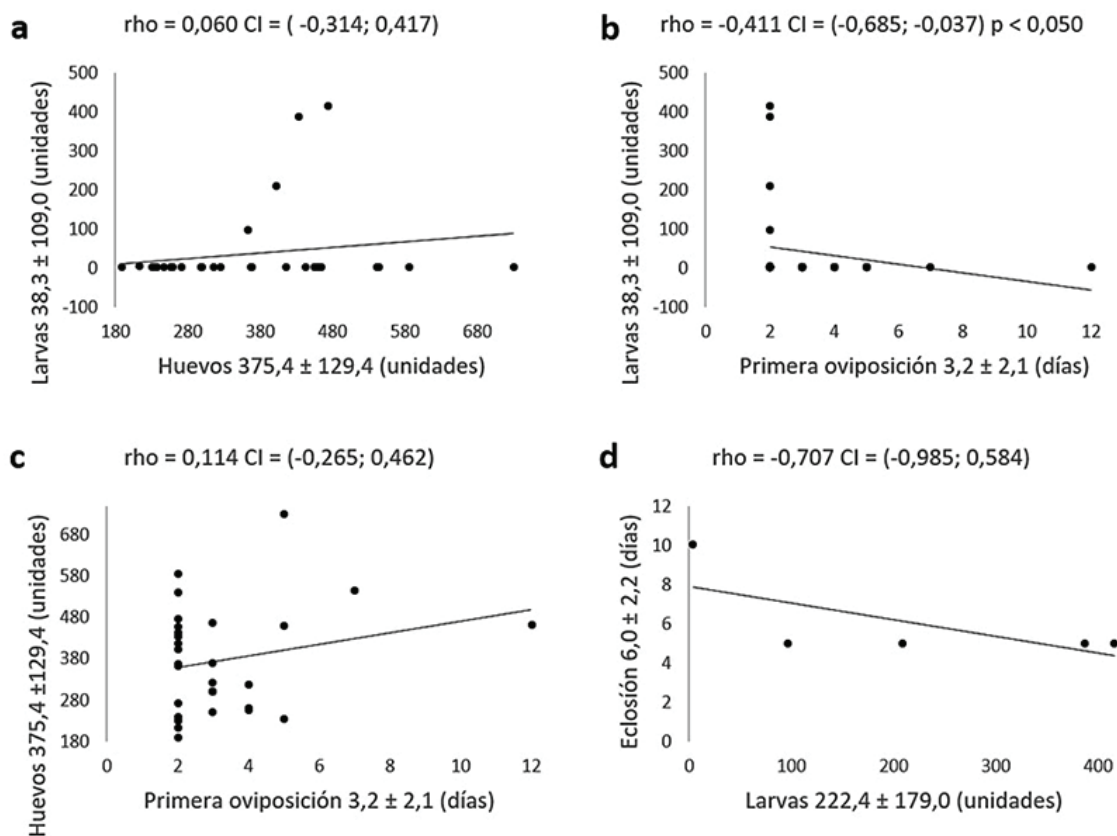


Figura 3. Matriz de correlación lineal de Spearman, Intervalo del 95 % de confianza para el coeficiente ρ y significancia de la prueba ($\alpha = 0,050$). Hembras en reproducción sexual. a, b, c. Relación para parejas que presentaron oviposición ($n=29$). d. Relación para larvas eclosionadas ($n=5$).

Aislamiento e identificación del parasitoide.

El control biológico viene a ser una alternativa para la reducción en el uso de productos químicos en los cultivos, la reducción de costos y el desarrollo de una agricultura más sostenible. Dentro del control biológico el uso de depredadores y parasitoides juega un papel importante, ya

que estos mantienen su acción reguladora en el tiempo, contrario a los productos químicos, evidenciando el gran potencial que tienen para controlar las principales plagas, enfermedades y arvenses que existen [26]. Los parasitoides son los organismos más utilizados en el control biológico [26], lo que evidencia que la búsqueda e identificación de nuevos microorganismos biocontroladores autóctonos o de ya existentes con nuevos hospederos es beneficioso y puede ser usado, en el futuro, como una fuente de control de una potencial plaga en los cultivos.

De las larvas colectadas inicialmente, tres presentaron indicios de parasitismo. Al dar el seguimiento de las mismas, en cada larva salieron de 3 a 4 pupas coarctadas de las cuales emergió un díptera (figura 4a). El adulto fue identificado como *Carcelia* sp. una mosca de la familia Tachinidae (figura 4b) [27]. Esta familia es de las más grandes de este orden, con aproximadamente 8 200 especies [27], los cuales son enemigos naturales importantes de plagas de insectos, especialmente de larvas de lepidópteros, por lo que son usados frecuentemente en el control biológico [28]. Se ha reportado que el taquínido *Carcelia reclinata* es un parasitoide polífago de *E. acrea* y otros lepidópteros defoliadores [28] [29]. Asimismo, [30] reportaron que el taquínido *Gymnocarcelia ricinorum* presenta un 35% de parasitismo natural contra *E. acrea* en el cultivo de la fresa.

Por otro lado, [31] reporta que todos los taquínidos son endoparasíticos, mayoritariamente de larvas de lepidópteros, los cuales poseen tres estadios larvales, atacan larvas o pupas, pueden ser solitarios o gregarios, dependiendo de la especie y que la fase pupal puede ocurrir tanto dentro como fuera del hospedador. Además, clasifica a los taquínidos, como koinobiontes conformadores, ya que, al parasitar al hospedero, este no muere, y más bien se beneficia que el hospedero se mantenga con vida, mostrando una integración fisiológica hospedante-parasitoide el cual requiere de las hormonas del hospedero para sincronizar su desarrollo. En este caso, *Carcelia* sp se comportó como un endoparasitoide, gregario, koinobionte, el cual forma su pupa dentro de un capullo afuera de la larva de *E. albida*.

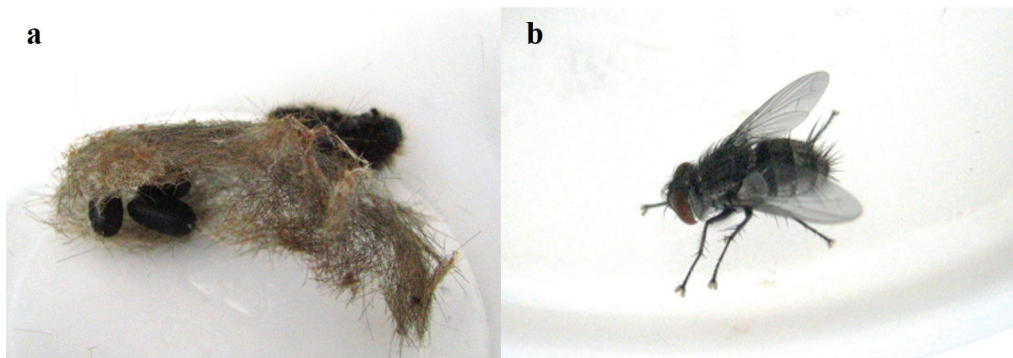


Figura 4. *Carcelia* sp. como parasitoide de *E. albida*. a- Pupas obtenidas de larvas parasitadas. b- Adulto

Conclusiones

Estigmene albida es un lepidóptero que pertenece a la familia Erebidae, superfamilia Noctuidae, el cual presenta muy poca información reportada en literatura. Se determinó que su ciclo de vida bajo condiciones ambientales controladas en laboratorio y bajo una dieta artificial fue de 57 días, reportando cinco estadios larvales muy similares a los que se reportan para *E. acrea*, pero presentando una fase pupal y de adultez con una duración mayor. Además, se logró determinar que, aunque las hembras partenogénicas ovipositaron en mayor proporción que las hembras

que copularon, ninguno de los huevos que produjeron fueron viables, caso contrario a las hembras sexuales, de las cuales el 17.2 % produjeron descendencia ovipositando en promedio 376 huevos por hembra, de los cuales el 59 % eclosionó en larvas viables. Además, se logró identificar a *Carcelia* sp. como un taquírido parasitoide para *E. albida*, el cual tiene potencial como posible agente biocontrolador para este lepidóptero.

Bibliografía

- [1] C. Pozo, B. Prado, y A. N. Castañeda-Sortibrán, "Updating Genomic Data of Lepidoptera en Short Views" en *Insect Genomics and Proteomics*, C. Raman, M. R. Goldsmith, y T. A. Agunbiade, eds, Springer International Publishing Switzerland, pp. 41-73, 2015.
- [2] M. A. Zumbado, y D. Azofeifa, "Insectos de Importancia Agrícola. Guía Básica de Entomología," Programa Nacional de Agricultura Orgánica (PNAO), Heredia, Costa Rica, 204 pp, 2018.
- [3] R. Zahiri, J. D. Holloway, I. J. Kitching, J. D. Lafontaine, M. Mutanen, y N. Wahlberg, "Molecular phylogenetics of Erebiidae (Lepidoptera, Noctuoidea)," *Systematic Entomology*, vol. 37, pp. 102-124, 2012.
- [4] J. C. Regier, C. Mitter, K. Mitter, M. P. Cummings, A. L. Bazinet, W. Hallwachs, D. H. Janzen, y A. Zwick, "Further progress on the phylogeny of Noctuoidea (Insecta: Lepidoptera) using an expanded gene sample," *Systematic Entomology*, pp. 1-12, 2017.
- [5] D. Hill, "Economic Importance of Insects: Harmful Insects," Springer, Dordrecht, Holanda, pp. 77-244, 1997.
- [6] B. C. Zhang, "Index of Economically Important Lepidoptera," CAB International, Wallingford, Connecticut, 599 pp, 1994.
- [7] J. A. Powell, y P. A. Opler, "Moths of Western North America". ProQuest Ebook Central, 2009.
- [8] GBIF, "Global Biodiversity Information Facility: *Estigmene albida* Stretch, 1874," 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.gbif.org/species/1813413>. [Último acceso: 20 Setiembre 2021].
- [9] G.S. Robinson, P. R. Ackery, I. J. Kitching, G. W. Beccaloni, y L. M. Hernandez, "Host – a database of the hostplants of the World's Lepidoptera Hostplants," Natural History Museum, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://www.nhm.ac.uk/our-science/data/hostplants/>. [Último acceso: 13 Setiembre 2021]
- [10] A. Del Mazo-Cancino, E. A. Malo, L. Cruz-Lopez, y J. C. Rojas, "Diel periodicity and influence of age and mating on female sex pheromone titre in *Estigmene acrea* (Lep., Arctiidae)," *Journal of Applied Entomology*, vol. 128, no. 6, pp. 459–463, 2004.
- [11] M. A. Martínez, y S. Ramírez, "Insectos presentes en *Morus alba* L. y *Moringa oleifera* Lamark," *Revista de Protección Vegetal*, vol. 29, no. 1, pp. 52-56, 2014.
- [12] D. Flores, R. Chacón, L. Moreira, F. Argüello, S. Barboza, R. Orozco, H. Villalobos, F. Albertazzi, M. Montero, A. M. Pérez, J. Rosales, A. C. Segreda, V. Jiménez, R. Buro, y W. Villalobos, "El cultivo del higo (*Ficus carica*) en Costa Rica," Editorial Universidad Estatal a Distancia, 138 pp, 2011.
- [13] A. Schmidt-Durán, V. Villalba-Velásquez, R. Chacón-Cerdas, K. Martínez, D. Flores-Mora, "Larval stage prediction model of *Spodoptera frugiperda* collected in fig (*Ficus carica*) and discovery of *Apanteles* sp. as its parasitoid," *Tecnología en Marcha*, vol. 28, no. 1, pp. 47-58, 2014.
- [14] F. Mora, y M. Valerín, "Catálogo de plagas Cuarentenarias de Costa Rica," Servicio Fitosanitario del Estado, Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2013 [En línea]. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/H10-7919.pdf> [Último acceso 20 Setiembre 2021].
- [15] Navarro R, Doreste E (1982) Desarrollo de *Heliothis zea* (Lepidoptera: Noctuidae) sobre dietas natural y artificial. *Agronomía Tropical* 32 (1-6): 69-79.
- [16] Minitab Inc, Versión 19, Estados Unidos, 2019.
- [17] J. Capinera, "*Estigmene acrea* (Drury) (Insecta: Lepidoptera: Erebiidae: Arctiinae)," Universidad de Florida, 2016 [En línea]. Disponible en: https://entnemdept.ufl.edu/creatures/veg/leaf/saltmarsh_caterpillar.htm. [Último acceso: 27 Setiembre 2021]
- [18] A. Borges, y L. Marrero, "Clave ilustrada de *Estigmene acrea* (Lepidoptera: Arctiidae): notas de su etología en el cultivo de la soya (*Glycine max*)," *Fitosanidad*, vol. 16, no. 3, pp. 125-127, 2012.
- [19] S. Scheu, y B. Drossel, "Sexual reproduction prevails in a world of structured resources in short supply," *Proc. R. Soc. B*, vol. 274, pp. 1225–1231, 2007.

- [20] F. Castrejón, A. Virgen, y J. C. Rojas, "Oviposition of the Saltmarsh Caterpillar Moth (Lepidoptera: Arctiidae) is Influenced by the Presence of Host Plant and Time of Day," *Southwestern Entomologist*, vol. 37, no. 2, pp.103-113, 2012.
- [21] P. V. Vail, T. J. Henneberry, y R. Pengalden, "An Artificial Diet for Rearing the Salt Marsh Caterpillar, *Estigmene acrea* (Lepidoptera: Arctiidae), with Notes on the Biology of the Species," *Annals of the Entomological Society of America*, vol. 60, no. 1, pp. 134-138, 1967.
- [22] A. T. Jordan, T. H. Jones, y W.E. Conner, "Morphogenetic Effects of Alkaloidal Metabolites on the Development of the Coremata in the Salt Marsh Moth, *Estigmene acrea* (Dru.) (Lepidoptera: Arctiidae)," *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, vol. 66, pp.183-189, 2007.
- [23] R. E. Fye, y H. K. Poole, "Effect of High Temperatures on Fecundity and Fertility of Six Lepidopterous Pests of Cotton in Arizona," *Production Research Report*, no. 131, pp. 1-8, 1971.
- [24] R. E. Fye, R. E y R. E. Surber, "Effects of Several Temperature and Humidity Regimens on Eggs of Six Species of Lepidopterous Pests of Cotton in Arizona," *Journal of Economic Entomology*, vol. 64, no. 5, pp. 1138-1142, 1971.
- [25] R. E. Fye y W. C. McAda, "Laboratory Studies on the Development, Longevity, and Fecundity of Six Lepidopterous Pests of Cotton in Arizona," *Technical Bulletin*, no. 1454, pp. 48-57, 1972.
- [26] C. R. Ballal, y A. Verghese, "Role of Parasitoids and Predators in the Management of Insect Pests" en *New Horizons in Insect Science: Towards Sustainable Pest Management*, A. K. Chakravarthy, ed, Springer India, pp. 307-326, 2015.
- [27] C. C. Trejo, "Biología de *Carcelia reclinata* Robineau Desvoidy (Diptera: Tachinidae) en condiciones de laboratorio," *Agro Productividad*, vol. 3, no. 2, 2010.
- [28] H. P. Tschorsnig, E. Seris, A. Cobo, G. Cobos, S. Pascual, J. Amador, y M. G. Núñez, "Tachinidae (Diptera) collected in traps used for mass-trapping of *Bactrocera oleae* (Rossi)(Diptera: Tephritidae) in olive groves in Central Spain," *Spanish Journal of Agricultural Research*, no. 4, pp. 1298-1306, 2011.
- [29] Fuentes, R. Dípteros parásitos de larvas de lepidópteros en algunos municipios del Valle del Cauca. *Acta agronómica*, vol. 23, no 1-2, pp. 7-50, 1973.
- [30] A. D. Sánchez-Arias, B. F. Monroy-Alcántara, S. Ordaz-Silva, I. V. López-Sánchez, J. L. Delgadillo-Ángeles, y J. G. Pedro-Méndez J. G. "Parasitismo natural de *Estigmene acrea* (Drury) (Lepidóptera: Arctiidae) por *Gymnocarcelia ricinorum* Townsend, (Diptera: Tachinidae) en el cultivo de la fresa," *Boletín de la Sociedad Mexicana de Entomología*, Número especial 4, pp. 33-36, 2017.
- [31] M. L. Dindo, "Tachinid parasitoids: are they to be considered as koinobionts?," *BioControl*, vol. 56, 249-255, 2011.

Chemical risk: state of the art of chemical substances exposure assessment

Riesgo químico: estado del arte sobre la evaluación a la exposición de sustancias químicas






Jose Carlos Mora-Barrantes¹, Karla Alfaro-Aguilar², Melany Murillo-Chaverri³, Marielia Calderón-Quesada⁴, Ana Julia González-Marín⁵

Fecha de recepción: 22 de setiembre, 2021

Fecha de aprobación: 8 de febrero, 2022

Mora-Barrantes, J.C., Alfaro-Aguilar, K., Murillo-Chaverri, M., González-Marín, A.J. Chemical risk: state of the art of chemical substances exposure assessment. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 130-139.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5875>

- 1 Atmospheric laboratory, Chemistry Department, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 2 Chemistry Department, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: karla.alfaro30@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-9697-5096>
- 3 Chemistry Department, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: me.macha.27@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-5590-1151>
- 4 Chemistry Department, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: maricalde20@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-4982-5375>
- 5 Chemistry Department, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: anajulia120184@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-8319-0799>

Keywords

Chemical risk; assessment; exposure; substances, effects.

Abstract

Given the ability of chemical substances to generate possible adverse effects on people's health, it is necessary to identify, collect and integrate all the information related to the dangers associated with these substances. Throughout the years, the definition of risk has had different interpretations, which has given rise to different alternatives for its evaluation and management. Currently, there are several equipment and tools used in chemical risk assessment. In the present study, a bibliographic review was carried out for different chemical scenarios where sixteen chemical risk assessment methodologies were analysed during the period 2003-2020 that correspond to both, qualitative and quantitative methods. In conclusion, the risk assessment methodologies have undergone changes over the years according to the needs and increasing complexity of the systems where they apply, artificial intelligence could also be a useful tool in chemical risk assessment.

Palabras clave

Riesgo químico; evaluación; exposición; sustancias; efectos.

Resumen

Dada la capacidad que tienen las sustancias químicas de generar posibles efectos adversos sobre la salud de las personas, es necesario identificar, recopilar e integrar toda la información relacionada con los peligros asociados a estas sustancias. A lo largo de los años, la definición de riesgo ha tenido diferentes interpretaciones, generando diferentes alternativas y formas para su evaluación y gestión. Actualmente, existen variados instrumentos científicos y herramientas metodológicas que se utilizan en la evaluación del riesgo químico. En el presente estudio se realizó una revisión bibliográfica para diferentes escenarios químicos, donde se analizaron dieciséis metodologías relacionadas con la evaluación del riesgo químico. La revisión del estado del arte comprendió artículos científicos publicados durante el periodo 2003-2020, incluyendo tanto a métodos cualitativos como cuantitativos. Como conclusión principal se indica que las metodologías de evaluación de riesgos han experimentado cambios a lo largo de los años producto de factores como las necesidades y la creciente complejidad de los sistemas donde se aplican y de la inteligencia artificial; esta última pudiendo ser una herramienta útil en la evaluación de riesgos químicos.

Introduction

Chemicals are present in our environment in one way or another and many of these are used to improve the quality of life. Various chemicals used in industry and in everyday life have been classified as toxic and dangerous to health and the environment; however, most chemicals are not harmful to the environment or health, although some have the potential to produce adverse effects [1]. Studies have shown an association between the use of toxic chemicals and the risk of developing chronic diseases such as dermatitis, nasal septum perforations, respiratory diseases and ulcers [2].

Chemical agents can enter the through body by inhalation (through respiration), dermal (through the skin), digestive (ingestion of the chemical) and parental (through wounds or punctures) route [3, 4]. High environmental concentrations can increase the amount of chemical that enters the through body, as well as the time of prolonged exposure and favorable conditions in the subject, such as rapid breathing, skin lesions or damage to the body that do not allow its to eliminate correctly the chemical agent [3].

Due to the use and exposure to chemicals, it is important to know the level of occupational risk to which people are exposed. Occupational risk refers to the possibility that a worker may suffer some damage (illness, pathology or injury) due to certain facts or actions derived from them work [5,6]. From the point of view of seriousness, occupational risk assesses both the probability and the severity of the damage [5] and makes it possible to recognize and compensate for such damage, whether as accidents at work or occupational diseases [6]. Chemicals have various properties, which carry different types of risks [7]. Chemical risk is the ability of chemical substances to generate possible adverse effects on people's health. This depends on the conditions and routes of exposure to the chemical agent, as well as on its physicochemical and toxicological properties [8].

Occupational risk evaluation

The occupational risk assessment is used in industrial streams or in facilities that handle chemical products, to determine potential hazards in the tasks performed. Its main objective is always to eliminate and / or reduce risks to the lowest possible level [9]. Within the workplace, it is essential to identify, collect and integrate all the information related to the supposed dangers of a chemical agent, as well as to enter into dose-exposure-damage [10].

Risk has had various interpretations throughout the years, therefore, different definitions of risk can lead to different alternatives for its evaluation and management. This is why risk assessment methods have undergone continuous development over the years, because they are also capable of evolving in parallel with the increasing complexity of the systems where they are applied [11].

Occupational exposure limit values

Exposure limit values are a form of evaluation criterion, defined as magnitudes of reference values for the concentrations of the different chemical agents and they are the value of a magnitude can be compared the reality to be evaluated. In the Latin American context, the exposure values used in the USA are used more specifically for TLVs, which are, according to the time metric, divided into several types as the following; [7]

- TLV-TWA. Time-weighted average. A normal day of 8 hours and 40 hours per week is estimated, with a daily exposure in which workers do not suffer adverse effects. Generically when speaking of TLV, reference is made to TLV-TWA
- TLV-C. Ceiling value is a concentration that must not be exceeded at any time
- TLV-STEL. Exposure limits for short periods of time. It is defined as the concentration to which workers can be exposed for a short period of time without having any type of adverse effect. The TLV-STEL is a complement to the time-weighted average (TWA). It is estimated as the 15-minute time-averaged mean exposure that does not have to be exceeded during the day.

International and national regulations

International regulations

In 1970, the Occupational Safety and Health Act was enacted in the United States. Under this law, the Occupational Safety and Health Administration (OSHA) and the National Institute for Occupational Safety and Health or NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) are created, which works together with OSHA to carry out investigations and offer recommendations for work-related injuries and illnesses, with the aim of promoting a safe and healthy workforce [7,12].

National regulations

The Political Constitution, in its articles 21 and 50, establishes that the right to life and health of persons is a fundamental right, where the State has an inexorable obligation to ensure their protection. Derived from this duty of protection, the General Regulation on Occupational Safety and Hygiene was created, where risk factors are analyzed according to the measures that must be taken to avoid damage to the health of workers. Chapter V of dangerous substances establishes in relation to the permissible limits of these substances, that this will be carried out in accordance with the provisions of the International Labor Organization [13,14].

Methodologies to assess chemical risk

Among the chemical risk assessment methods are; the British model COSHH Essentials, the French model from the Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) [15], Chemical Risk Management (CHARM) [14], Stoffenmanager, ECETOC TRA Targeted Risk Assessment, Advanced REACH Tool (ART) [16], New Approach Methodologies (NAM) [17], Critical Task Exposure Screening (CTES) [18], Artificial Intelligence for Chemical Risk Assessment [19], Lung function tests [20], SQCRA Method [31] [33], PBPK Model for Modified Ethanol [20], Chem-SAM, UOW and SQCRA Methods [21], Chemical Health Risk Assessment (CHRA) [22], Exposure to Ultrafine Particles [23], Application of PBPK models in support of derivation of toxicity reference values for 1,1,1-trichloroethane [24], Assessment of hazards and risks of industrial chemicals in the occupational context in Europe: some current problems [25].

Control of Dangerous Substances for Health (COSHH Essentials)

N.P. Vaughan., *et al.* [26] made a comparison between the target concentration ranges in the air taking into account the initial classification that COSHH essentials made to 111 substances that had a current Occupational Exposure Limit (OEL) based on health in Great Britain and extended it to a wide range of substances (over 95%, 850 substances) that did not yet have a recognized OEL. The exercise included substances with OEL published by nine international organizations; and the threshold levels (DNEL) assigned by registrants in the EU: Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). It was concluded that when comparing the 8-hour TWA OELs for 850 substances extracted from nine bodies and a limited number of DNELs, the target concentration ranges of C-E in air remain valid [26].

Chemical Risk Management (CHARM) and Control of Dangerous Substances for Health (COSHH Essentials)

M. Kim, *et al.* [27] carried out a chemical risk assessment of 59 carcinogenic, mutagenic and reprotoxic substances (CMR). During their study they used the COSHH Essentials (UK) and the CHARM (South Korea) methods separately. Among the results obtained with these two methods is that the identified risk level was much lower for CHARM than for COSHH Essentials; the risk assessment was high for both, but the exposure assessment was low for both. CHARM

determines the level of exposure based on measurements of the chemical work environment. COSHH Essentials assesses exposure levels using physical properties and general handling, and assesses the hazard using the H-phrases or R-phrases. It has been judged to be more conservative than CHARM [27].

Simplified Chemical Risk Assessment Methodology (INRS) and Control of Hazardous Substances for Health (COSHH Essentials)

A. Segura & A. R. Mauri [15] made a comparison of the risk assessment in a research laboratory at the University of Valencia, Spain, where a wide variety of chemical agents are used, usually in small quantities. The researchers used simplified chemical inhalation risk assessment methods (COSHH Essentials and INRS-based method). During fieldwork, information was collected on agents used, quantity, mode of use, frequency of use, working temperature and collective and individual protection used. Likewise, the information has been supplemented with the necessary data, R and H phrases, environmental limit value and boiling temperature. The main conclusion of the research is that both methods can be a simple resource to plan prevention in work environments with chemical risk. The INRS-based method contemplates more risk determinants than COSHH Essentials, but the disparate characteristics of both methods should determine the best choice for each situation; or even, as the results of this study suggest, its complementary use [15].

Stoffenmanager, ECETOC TRA v3. and ART

N. Savic, *et al.* [16] investigated the degree of consistency for evaluating the risk of exposure to vapors from volatile liquids, powders and abrasive solids, and for non-volatile liquids mixtures. During the study, the Stoffenmanager, ART and ECETOC TRA v3 risk assessment tools were applied separately. In this analysis the translation rules between the models defined in TREXMO were used to generate 319,000 different situations of *in silico* exposure in ART, Stoffenmanager and ECETOC TRA v3. The estimates of the three models were calculated and the correlation and coherence between them were investigated. The main conclusions are that the best correlated pair was Stoffenmanager-ART (R, 0.52-0.90), while the ART-TRA and Stoffenmanager-TRA correlations were the lowest (R, 0.36-0.69) or no correlation was found. In general, the models were more consistent for vapors than for powders and solids, near fields than for far fields and indoors than for outdoor exposure [16].

New approach methodologies for exposure science

Wambaugh, J.F. *et al.* [17] theoretically analyzed several NAMs (New approach methodologies for exposure science) that are applied around the research that is currently carried out in collaboration with the ExpoCast project ('Exposure forecast') of the Environmental Protection Agency of the States United (EPA), to characterize the routes of exposure. It describes how these NAMs can be combined with hazard information to establish exposure models, chemical priorities, including the identification of highly exposed or susceptible populations taking into account human variability in exposure. Finally, the great importance of current advances in high performance methods for hazard identification is concluded. Together, these new approaches allow for greater certainty about the environment in which we are exposed and its impact on public health [17].

Critical Task Exposure Screening (CTES)

E. Tjoe-Nij, *et al.* [18] conducted a Critical Task Exposure Screening (CTES) study at a global chemical company where they evaluated 5 tasks using three chemicals: trimethylamine (three tasks), isopropanol (one task), and paramethoxyphenol (one task). To carry out the study,

information was collected on the chemical agents studied (toxicological data, including the occupational exposure limits (OEL), the occupational exposure band (OEB) and the vapor pressure), they specified the concentrations of the substance and the tasks and their duration were described. For each substance, inhalation risk scores (which were compared with results obtained using the ART 1.5 model), skin hazards with warnings for local and systematic adverse effects, and status of CMR effects were obtained. Trimethylamine presented the task with the highest risk. The main conclusion of this study is that CTES is an easy-to-use and reliable tool that allows establishing priorities and focusing on the most critical scenarios, in addition that the ART 1.5 model can be included effectively in detection tools such as the one described [18].

Artificial Intelligence for the Evaluation of Chemical Risks

C. Wittwehr, *et al.* [19] conducted an assessment of how, and to what extent, artificial intelligence can support chemical risk assessment. These scientists believe that the use of artificial intelligence can improve various areas, among which are the identification and prioritization of problems, improvement of the evidence base (adding, interpreting and processing useful information), discovery of knowledge (joining information from different sources), evaluation process in a neutral, coherent and transparent way, and through the construction of cognitive and decision-making models. In conclusion, it is recommended that further exploration of these issues in conjunction with the global collaboration of various disciplines materialize into executable plans for pilot projects, in order to improve the effectiveness and efficiency of the chemical risk assessment process [19].

Lung function tests

Y. Mehrifar, *et al.* [20] carried out a cross-sectional study in an Iranian shipbuilding factory, with the purpose of determining the incidence of respiratory symptoms and lung function, in welders exposed to the effect of toxic gases and metallic fumes resulting from the SMAW, GMAW and FCAW welding processes. For this study, 60 welders and 45 factory administrative employees were selected. The toxic gases evaluated are CO, NO, NO₂, O₃ and CO₂, regarding the toxic fumes, the total smoke and six metals (Cr, Mn, Mg, Cu, Fe and Al) were evaluated. All contaminants were taken from the respiratory tract of welders and analyzed using standard methods suggested by the American National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). A pulmonary function test (PFT) was also performed using calibrated MIR spirometry. In conclusion, it was determined that welding, especially of the GMAW type, is related to the production of large amounts of metal gases and fumes and drastically deteriorates lung function in welders [20].

SQCRA method

S. Karimi Zeverdegani, *et al.* [28] carried out a cross-sectional study in an Iranian steel factory in order to assess the risk of exposure to gases produced by the PAW, SAW and GTAW welding types. To do this, the researchers used the Semi-Quantitative Chemical Risk Assessment (SQCRA) method proposed by the Occupational Safety and Health Division of the Singapore Ministry of Human Resources. During fieldwork the concentration of O₃, CO, NO, NO₂ and CO₂ was obtained by means of direct reading instruments known as real-time instruments, including detector tubes (GASTEC Corporation, Japan) and piston pump (Gastec GV-100- S-TR, GASTEC Corporation, Japan). The main conclusion of the study is that there should be greater control in the welding processes, for which the use of respiratory protection equipment and extraction ventilation is recommended [28].

H. Dazi, *et al.* [29] carried out a cross-sectional study in one of the petrochemical industry complexes, in a special area of Assaluyeh, Iran, workers are exposed to various dangerous chemical factors. During the evaluation, the SQCRA method and spirometry were also used through a series of experiments in pulmonary function tests (PFTS). Information was collected on the toxic and / or dangerous effects of chemical reagents, vapor pressure or particle size of the chemical, OT / PEL radio, safety measures, amount of material used per week and amount of time worked per week. Of the materials used by workers 48.14% present a low chemical risk, 29.62% medium chemical risk, 18.51% high chemical risk and 3.7% very high chemical risk [29]. Similarly, M. H. Beheshti *et al.* [30] used the SQCRA method in the operating unit of an Iranian petrochemical company with high amounts and exposure to various chemical contaminants. The results obtained indicate that 81% of the chemicals used have a moderate or high chemical risk [30].

PBPK model for modified ethanol

A. Maier, *et al.* [31] conducted a safety assessment using a Weight-Of-Evidence (WOE) approach using a Physiologically Based Pharmacokinetic (PBPK) model, in order to assess the potential adverse effects on development and reproduction related to the use of alcohol-based hand sanitizers (ABHS) in healthcare workers. Two different application scenarios were evaluated: hand hygiene application (small amounts with several applications per day) (modeled after a description made by the US FDA and data found in the open literature) and surgical application (higher amount and fewer applications per day) (conditions based on studies by Kramer *et al.*, 2017 and on an alternative typical product use scenario). The model considered the skin compartment to allow simulation of dermal exposures and the inclusion of the hepatic form and urinary excretion of ethyl glucuronide, used as a biomarker for ethanol exposures. The study concluded that the use of ABHS by healthcare workers is safe, even under hypothetical conditions of the worst use scenarios [31].

Chem-SAM, UOW and SQCRA methods

S. Karimi Zeverdegani, *et al.* [21] made a comparison of the risk assessment in a chemical laboratory using three different methodologies; the Chemical Risk Management Self-Assessment Model (Chem-SAM), the University of Wollongong (UOW) Risk Assessment method and the Semi-Quantitative Chemical Risk Assessment (SQCRA) method. During fieldwork, information was collected regarding chemical toxicity, exposure, risk controls, chemical reactions, etc. Compiled the data indicated by each methodology, a statistical analysis was performed using SPSS (Version 20.0, IBM Corporation, Armonk, NY, USA) and a graph was drawn with the Excel software. The main conclusion of the research is that the three methodologies presented similar results on the level of risk of exposure at the evaluated site [21].

Chemical Health Risk Assessment (CHRA)

S. N Hunadia, A. Bakar, SR Sheikh & N. Anuara [22] carried out a Chemical Health Risk Assessment (CHRA) on the use of chemical agents in thirteen teaching and research laboratories of the Department of Chemistry and Process Engineering (JKKP) at the National University of Malaysia. To obtain the Risk Rating (RR), the Exposure Rating (ER) and the Hazard Rating (HR) were evaluated, also, the duration of exposure, the degree of presence, release and chemical absorption of the agent were studied. The final risk rating for all laboratories tested was C3, indicating that the department needs to identify measures, precautions, monitoring requirements, or health surveillance to maintain controls and decrease exposures. As part of the results, the university's security committee carried out monthly inspections of the evaluated sites for periodic monitoring and control [22].

Exposure to ultrafine particles

G. Buonanno *et al.* [23] carried out an evaluation on the influence on activity and time patterns on the levels of exposure to ultrafine particles present in certain activities and everyday microenvironments in central Italy (southern Lazio, in the macrozone Frosinone) during the summer and winter. Twenty-four non-smoking couples (12 in summer and 12 in winter) were selected, consisting of a man who works full time and a woman who only performs domestic chores, belonging to urban, suburban and rural areas. A mobile experimental device consisting of two portable UFP counters (NanoTracer, Philips) equipped with GPS tracking was placed on each person. During this research, information was collected on the concentration of the number of particles, the surface area of particles deposited in the lung, and the mean diameter of the particle number size distributions. An average concentration of higher number of particles was observed in women both in summer and winter, although mostly in the latter due to a reduction in indoor ventilation and outdoor inversion phenomena. Regarding the deposition of particles in the alveolar surface area, this was higher in women only in winter [23].

Application of PBPK models to support the derivation of toxicity reference values for 1,1,1-trichloroethane

L.Yasoung *et al.* [24] developed a review of the published literature of the PBPK models, for the extrapolation of doses, routes, and species, specifically for 1,1,1-trichloroethane and thus assess their applicability in the derivation of reference values in various durations of exposure. The experimental part included a multi-step reconstruction, testing, and evaluation of the PBPK models. The most adaptable model was found to be that published by El Reitz *et al.* (1988). It is concluded that the analysis shows that in the case of 1,1,1-trichloroethane toxicity, PBPK modeling can provide a scientifically credible alternative to the frequently used predetermined extrapolations in risk / health assessments [24].

Assessment of hazards and risks of industrial chemicals in the occupational context in Europe: some current problems

S. Fairhurst, conducts a study on industrial chemicals within the framework of the European continent, as well as existing regulations, indicate the limitations for the correct identification of risks and hazards as well as the existing gaps in the regulation of dangerous chemicals, as part of the investigation, two routes of classification of dangerous substances are proposed; Self-classification by suppliers and adherence to specific decisions of the European Union imposed by regulators. It is concluded that there are numerous scientific problems. that they remain unsolved, where knowledge and understanding is inadequate; There are many problems to discuss and considerable room for further improvement in the topic of chemicals management [25].

Conclusions

In total, sixteen methods applied during the years 2003 to 2020 were analyzed in different chemical scenarios such as laboratories, companies, steel, naval and petrochemical industries.

Among the most widely used methodologies are the Semi-Quantitative Chemical Risk Assessment method, the Physiologically Based Pharmacokinetic model and the British COSHH Essentials model.

Most of the methods use qualitative or quantitative systems or direct measurements by means of equipment such as ultrafine particle monitoring equipment, spirometers and direct reading instruments in real time.

Among the shortcomings of the methodologies are the difficulty in obtaining representative and truthful information, its little applicability to different exposure scenarios and the different criteria by analysts at chemical risk.

Among the advantages of the studied methods are the possibility of carrying out *in-silico* studies, which avoids the need to experiment in humans; they allow obtaining a reliable level of risk without the need to carry out environmental measurements; In addition, they provide a hierarchy of risk based on a general criterion.

The methods agree that the risk assessment needs to be carried out according to a systematic analysis where the objectives and steps to be followed are determined according to the needs, conditions and characteristics required by the researcher or analyst.

Artificial intelligence is viewed as a tool that could provide results with greater precision and accuracy, as well as offering efficiency in the chemical risk assessment process.

References

- [1] T. S. Dikshith, "Hazardous chemicals: safety management and global regulations". CRC press, New York: USA. 2013,
- [2] H.Tounsadi, Y. Metarfi, M. Taleb, K. El Rhazi y Z. Rais, "Impact of chemical substances used in textile industry on the employee's health: Epidemiological study", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 197, pp. 110594, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110594>
- [3] M. Parra, *Conceptos básicos en salud laboral*. Santiago de Chile: Oficina Internacional del Trabajo, OIT, pp. 12, 2003. [Online]. Disponible: <http://www.edpcollege.info/ebooks-pdf/ser009.pdf>
- [4] J. Lorenzo, *Curso de Higiene Industrial, Evaluación de Agentes Químicos*. MAZ, nd, pp. 10-11.[Online]. Disponible: <http://www.ingenieroambiental.com/2020/Curso%20De%20Higiene%20Industrial.pdf>
- [5] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo, "Fundamentos para la prevención de riesgos laborales", p. 16, 2017. [Online]. Disponible: <https://www.insst.es/documents/94886/96076/NIPO+fund/789c688f-e753-49b4-bb19-67e53bd7ec28>
- [6] P. Boix y L. Vogel, "La evaluación de riesgos en los lugares de trabajo: Guía para una intervención sindical. Oficina Técnico Sindical para la Salud y Seguridad", p. 7, 2000. [Online]. Disponible http://istas.net/descargas/Evaluacion_riesgos_It.pdf
- [7] J. Aguilar, M. Bernaola, P. Rams, C. Tanarro *et al.*, *Riesgo químico: sistemática para la evaluación higiénica*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de trabajo y Migración, Madrid, España. 2010
- [8] R. Alami, A. Elyadini y M. Zouhdi, "Assessment of chemical risks in Moroccan medical biology laboratories in accordance with the CLP Regulation". *Safety and Health at Work*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.03.003>
- [9] J.J.Hurtado, J. L.Romero, A.L. Mexia *et al.*, *Manual de evaluación de Riesgos laborales*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Ministerio de trabajo y Migración, Sevilla, España, 2004
- [10] Organización Mundial de la Salud & Programa Internacional sobre Seguridad de las Sustancias Químicas. Herramienta de evaluación de riesgos para la salud humana de la OMS: Peligros químicos. Ginebra, 2017. [Online]. Disponible: https://www.who.int/ipcs/publications/ra_toolkit/es/
- [11] V. Villa, N. Paltrinieri, F. Khan y V. Cozzani, "Towards dynamic risk analysis: A review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry." *Safety science*, vol. 89, pp. 77-93, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.06.002>
- [12] United States Department of Labor. "OSHA Laws and Regulations". <https://www.osha.gov/laws-regs/oshact/completeoshact>. (Recuperado el 11 de junio del 2020)
- [13] Asamblea Nacional Constituyente. "Constitución Política". [Online]. Disponible: http://www.pgrweb.go.cr/scij/busqueda/normativa/normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=871¶m1=NRTC&strTipM=TC
- [14] Poder Ejecutivo. "Reglamento General de Seguridad e Higiene de Trabajo". [Online]. Disponible: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=57796&nValor3=103868&strTipM=TC

- [15] A. Segura y A. R. Maurí, "Comparación de dos métodos de evaluación simplificada del riesgo químico por inhalación en un laboratorio universitario (COSHH Essentials y método basado en el INRS)". *Arch Prev Riesgos Labor*, vol. 19, no. 2, pp. 107-109, 2016. doi: 10.12961/aprl.2016.19.02.5
- [16] N. Savic, B. Gasic y D. Vernez, "ART, Stoffenmanager, and TRA: A Systematic Comparison of Exposure Estimates Using the TREXMO Translation System", *Annals of Work Exposures and Health*, vol. 62, no 1, pp. 72-87, 2018. doi: 10.1093/annweh/wxx079
- [17] J. F. Wambaugh, J.C.Bare. C.C Carignan, K.L.Dionisio *et al.* "New approach methodologies for exposure science". *Current Opinion in Toxicology*, vol. 15, 76-92, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2019.07.001>
- [18] E.Tjoe-Nij, C. Rochin, N. Berne, A. Sassi and A.Leplay, "Chemical Risk Assessment Screening Tool of a Global Chemical Company". *Safety and health at work*, vol. 9, no. 1, pp. 84-94, 2018- DOI: 10.1016/j.shaw.2017.06.012
- [19] C. Wittwehr, P. Blomstedt, J. P. Gosling, T. Peltola, B. Raffael, A. N. Richarz, M. Sienkiewicz, P. Whaley, A. Worth, y M. Whelan, "Artificial Intelligence for chemical risk assessment", *Computational Toxicology*, vol. 13, p. 100114, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2019.100114>
- [20] Y. Mehrifar, Z. Zamanian, y H. Pirami, "Respiratory exposure to toxic gases and metal fumes produced by welding processes and pulmonary function tests", *The international journal of occupational and environmental medicine*, vol. 10, no. 1, p. 40, 2019. doi: 10.15171/ijoem.2019.1540
- [21] S. Karimi Zeverdegani, S. Barakat, y M. Yazdi, "Chemical risk assessment in a chemical laboratory based on three different techniques", *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, vol. 5, no. 3, pp. 168-175, 2016. DOI: 10.18869/acadpub.johe.5.3.168
- [22] S. N. Husin, A.B. Mohamad, S.R.S. Abdullah and A. Nurina. "Chemical health risk assessment at the chemical and biochemical engineering laboratory", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 60, 300-307, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.383>
- [23] G. Buonanno, L. Stabile, y L. Morawska, "Personal exposure to ultrafine particles: the influence of time-activity patterns", *Science of the Total Environment*, vol. 468, pp. 903-907, 2014.
- [24] Y. Lu, S. Rieth, M. Lohitnavy, J. Dennison, H. El-Masri, H.A. Barton, J. Bruckner & R. S. H. Yang. "Application of PBPK modeling in support of the derivation of toxicity reference values for 1,1,1-trichloroethane." *Regulatory Toxicology and Pharmacology* : RTP, 50(2), 249–260., 2008. DOI: 10.1016/j.yrtph.2007.12.001
- [25] S. Fairhurst, "Hazard and risk assessment of industrial chemicals in the occupational context in Europe: some current issues", *Food and Chemical Toxicology*, 41:1453-1462, 2003. DOI: 10.1016/S0278-6915(03)00193-5
- [26] N. P. Vaughan y R. Rajan-Sithamparanadarajah, "An Assessment of the Robustness of the COSHH Essentials (C-E) Target Airborne Concentration Ranges 15 Years on, and Their Usefulness for Determining Control Measures", *Annals of Work Exposures and Health*, vol. 61, no 3, pp. 270–283, 2017. doi: 10.1093/annweh/wxx002
- [27] M. Kim, S. Shin, S. Byeon, "Comparison of chemical risk assessment methods in South Korea and the United Kingdom". *Journal of Occupational Health*, n°. 57, pp. 339-345. doi:10.1539/joh.14-0253-oa
- [28] S. Karimi Zeverdegani, Y. Mehrifar, M. Faraji, y M. Rismanchian, "Occupational exposure to welding gases during three welding processes and risk assessment by SQRCA method", *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, vol. 6, no. 3, pp. 144-149, 2017. DOI: 10.29252/johe.6.3.144
- [29] H. Dazi, P. Heydari, S. Shokri, S. Varmazyar, y A. Safari Variani, "Semi-quantitative assessment of the health risk of occupational exposure to chemicals and evaluation of spirometry indices on the staff of petrochemical industry", *Archives of Hygiene Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 49-57, 2017. DOI: 10.29252/ArchHygSci.6.1.49
- [30] M. H. Beheshti, A. Firoozi Chahak, A. A. Alinaghi Langari, y S. Rostami, "Semi-quantitative risk assessment of health exposure to hazardous chemical agents in a petrochemical plant", *Journal of Occupational Health and Epidemiology*, vol. 4, no. 1, pp.1-8, 2015. <https://doi.org/10.18869/acadpub.johe.4.1.1>
- [31] A. Maier, J.L. Ovesen, C.L. Allen, R.G. York *et al.* "Safety assessment for ethanol-based topical antiseptic use by health care workers: evaluation of developmental toxicity potential". *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. 73, no. 1, 248-264, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.07.015>

Análisis energético del edificio N°1 de la Universidad Tecnológica de Panamá: simulación y optimización del consumo de energía eléctrica a través de soluciones de eficiencia energética

Energy analysis of building N°1 of the Technological University of Panama: simulation and optimization of electrical energy consumption through energy efficiency solutions

Constantino Gollini-Mihalopoulos¹, Aránzazu Berbey-Alvarez², Félix Henríquez³

Fecha de recepción: 20 de setiembre, 2021
Fecha de aprobación: 7 de febrero, 2022

Gollini-Mihalopoulos, C., Berbey-Alvarez, A., Henríquez, F. Análisis energético del edificio N°1 de la Universidad Tecnológica de Panamá: simulación y optimización del consumo de energía eléctrica a través de soluciones de eficiencia energética. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 140-151.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5874>

1 Universidad Tecnológica de Panamá. Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI). Panamá. Correo electrónico: constantino.gollini@utp.ac.pa

 <https://orcid.org/0000-0003-1539-1924>

2 Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá. Correo electrónico: aranzazu.berbey@utp.ac.pa

 <https://orcid.org/0000-0003-4278-5478>

3 Universidad Tecnológica de Panamá. Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI). Panamá. Correo electrónico: felix.henriquez@utp.ac.pa

 <https://orcid.org/0000-0002-9009-2599>

Palabras clave

Energía eléctrica; eficiencia energética; edificación sostenible; energía renovable; huella de carbono.

Resumen

La Agencia Internacional de la Energía en 2017 estimó que el 40% de la reducción de emisiones de gases contaminantes necesarias para que en 2050 se limite a dos grados el incremento de temperatura global, podría lograrse a partir de las medidas de eficiencia energética. En esta investigación se evaluó por medio de software el consumo de energía eléctrica anual del edificio N°1 de la UTP, se comparó el resultado con la facturación más reciente disponible y se propuso medidas de eficiencia energética, cuyos beneficios económicos y ambientales fueron también estudiados. Entre las propuestas planteadas se encuentran la instalación de lámparas LED, generación fotovoltaica, adaptaciones al sistema de acondicionamiento de aire, ventanas eficientes y ventilación del ático de la cubierta del edificio N°1 junto a la instalación de barreras radiantes. Los resultados obtenidos evidencian un consumo de 2 497 912 kWh/año, los cuales se verían reducidos en un 38.81%, representando un ahorro hasta de B/. 218 426.14 anuales y una disminución del 57.27% de emisiones de CO₂.

Keywords

Electrical energy; energy efficiency; sustainable building; renewable energy; carbon footprint.

Abstract

In 2017, the International Energy Agency estimated that 40% of the reduction in pollutant gas emissions needed to limit the global temperature increase to two degrees by 2050 could be achieved from energy efficiency measures. In this research, the annual electricity consumption of building N°1 of UTP was evaluated by software, the result was compared with the most recent billing available and energy efficiency measures were proposed, whose economic and environmental benefits were also studied. Among the recommended proposals are the installation of LED lamps, photovoltaic generation, adaptations to the air conditioning system, efficient windows, and ventilation of the attic of the roof of building N°1, together with the installation of radiant barriers. The results obtained show a consumption of 2 497 912 kWh / year, which would be reduced by 38.81%, representing a saving of B /. 218 426.14 per year and a decrease of 57.27% in CO₂ emissions.

Introducción

El concepto de eficiencia energética es reciente. Desde la llamada “crisis del petróleo” de los años 70, los países más desarrollados, al verse entre los más afectados por la situación, comprendieron la necesidad de crecer haciendo mejor uso de la energía [1]. A partir de ese momento, la eficiencia energética ganó importancia en la sociedad como un factor de la reducción de costos, basada en el desarrollo tecnológico y la promoción de prácticas de la correcta gestión de la energía [2].

Si se considera la disponibilidad finita de los recursos naturales y recursos energéticos no renovables, resulta importante evaluar continuamente nuestra seguridad energética y establecer programas de ahorro y uso eficiente de la energía, no sólo con la finalidad de hacerla

menos costosa, sino para para tratar de preservar parte de estos recursos y poder asegurar la satisfacción de las necesidades del presente y no comprometer las exigencias o capacidades de las generaciones futuras [3].

Planes de eficiencia energética han sido propuestos por diferentes naciones como acción para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero tras la quema de combustible fósil, causantes del desequilibrio climático y la repercusión directa en las actividades económicas [2]. Se entiende entonces que disminuir la demanda de combustible tiene efectos ventajosos sobre el costo de la energía y beneficiosos sobre el ambiente.

En los últimos cuarenta años, el sistema energético de Panamá ha experimentado cambios dramáticos. A pesar de que los precios de la energía han aumentado significativamente durante todo ese período, el consumo de energía ha crecido de forma considerable [1]. La Ciudad de Panamá se ha desarrollado rápidamente en el área de la construcción, sector que presenta un rol clave en el ámbito energético, considerando que los edificios consumen alrededor del 40% de la energía a escala mundial [4].

Basándose en lo anterior, se evaluó el consumo de energía eléctrica del edificio N°1 de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) y se plantearon soluciones de eficiencia energética, además, se cuantificó tanto el ahorro económico como las emisiones de CO₂ que supondría la aplicación de estas medidas. El cálculo se llevó a cabo usando la herramienta Green Building Studio (GBS) [5] [6] [7], actuando sobre el modelo arquitectónico desarrollado en Revit, todas estas herramientas propiedad de Autodesk. Otras herramientas complementarias como DIALux y VLT Energy Box 2 de Danfoss también fueron utilizadas.

Metodología

Con la finalidad de obtener un consumo de energía eléctrica teórico y poder cargar los valores energéticos en Revit, se le solicitó a la Dirección General de Ingeniería y Arquitectura de la UTP los planos arquitectónicos, de iluminación y del sistema de acondicionamiento de aire correspondientes al edificio. Se realizó un inventario incluyendo los dispositivos de cada sistema demandante y se estimó mediante la ec.(1) el consumo de energía eléctrica teórico diario y posteriormente anual, considerando 189 días de operación al año, excluyendo los sábados y domingos.

$$E=Pxt \quad (1)$$

Donde E es la energía diaria en kWh, P es la potencia del equipo demandante en kW y t es el tiempo de su uso en horas.

Para el caso de equipos electromecánicos, como ventiladores y bombas, se utilizó la ec.(2) donde se introduce una eficiencia de conversión eléctrica-mecánica igual a 85%.

$$E = \frac{Pxt}{0.85} \quad (2)$$

En Revit se desarrolló el modelo arquitectónico del edificio N°1 y se configuró cada espacio con información de interés energético, tales como número de ocupantes, densidad de potencia en iluminación y equipos en general, su acondicionamiento, entre otros. En el caso de los materiales que forman parte de la envolvente del edificio, estos se configuraron atendiendo al valor más cercano de coeficiente de transferencia de calor U. Por último, se estableció la ubicación del proyecto, en este caso se utilizó la estación meteorológica virtual más cercana. Como sistema de climatización, se seleccionó el más próximo al que se encuentra originalmente en el edificio, este consistió en un chiller y sistema de volumen constante con torre de enfriamiento. El modelo energético del edificio N°1 se muestra en la figura 1.

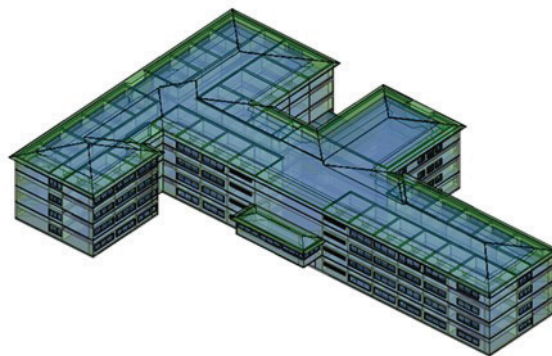


Figura 1. Modelo energético del Edificio N°1 antes de simulación.

Una vez que se obtuvo el consumo de la energía eléctrica en GBS, este se comparó con la facturación más reciente disponible y se evaluaron algunas medidas de eficiencia energética mediante el software.

Resultados

El consumo eléctrico teórico anual obtenido fue de 2 404 170.72 kWh, del cual el 72.90% pertenece al sistema de climatización, el 18.15% a iluminación y el restante al consumo de equipos generales.

La simulación realizada por GBS presentó un consumo igual a 2 497 912 kWh/año como se evidencia en la figura 2.

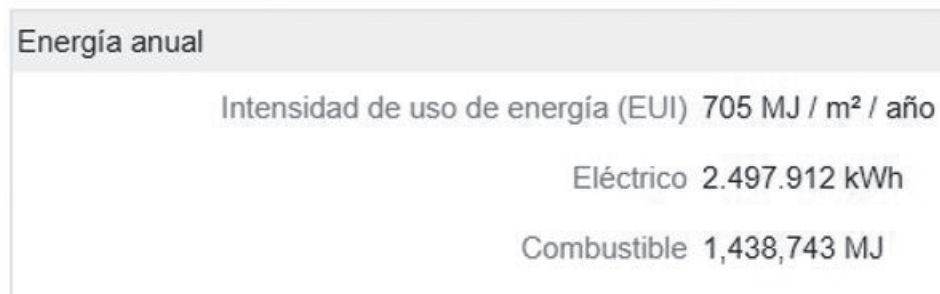


Figura 2. Desglose del consumo de energía en el edificio N°1.

Los resultados presentados por Carrizo [8] y Gonzáles [9] indican un consumo de energía eléctrica igual a 1 237 160 kWh/año y 3 284 810 kWh/año para dos de los otros edificios pertenecientes al Campus Víctor Levi Sasso de la UTP. Al incluir al edificio N°1 se obtiene un consumo total de 7 019 882 kWh al año.

En el último informe disponible [10], donde se incluye la facturación eléctrica total del campus, se refleja un consumo total anual de 7 436 100 kWh. La diferencia de energía eléctrica entre los resultados obtenidos por simulación y el presente en la facturación se debe a que no se ha simulado el comportamiento energético de la cafetería de administrativos y el edificio de Secretaría General, siendo entonces los resultados obtenidos por GBS muy próximos al comportamiento real de los distintos edificios.

Con base en el consumo de energía teórico, se plantearon propuestas de eficiencia energética sobre el sistema de iluminación, sistema de climatización y se agregó generación fotovoltaica para cubrir parcialmente la demanda eléctrica.

Sustitución de lámparas fluorescentes por lámparas LED

Se utilizó el software DIALux para modelar un salón de clases típico de la UTP y evaluar el nivel de iluminación con lámparas idénticas a las presentes actualmente, pero en su versión LED (Feilo Sylvania, modelo 507 LED). Los resultados en DIALux mostraron un nivel de iluminación promedio adecuado (579 lux) con base en la Resolución N°93-319 [11], donde se establecen los niveles de iluminación mínimos para interiores en la República de Panamá (300 lux para aulas de clase). La densidad de potencia por iluminación en el salón de clases disminuyó de 16.10 W/m² a 8.24 W/m², es decir, una diferencia porcentual de 48.82%. Al incluir estos valores de potencia nuevamente sobre el modelo en Revit y simular el consumo de energía eléctrica, se obtuvo un valor de 2 013 693 kWh anuales, lo que representa una reducción del 19.38% respecto al caso base.

Generación eléctrica con energía fotovoltaica

Con la herramienta “Sun” de Revit se realizó un estudio solar sobre la cubierta del edificio N°1, obteniéndose una insolación acumulada de 6 876 293 kWh para el año 2020, prácticamente homogénea a lo largo de toda la superficie.

Se seleccionó parte de la cubierta, figura 3, para la instalación de módulos fotovoltaicos de 16% de eficiencia, cubriendo un área total de 1 523 m².

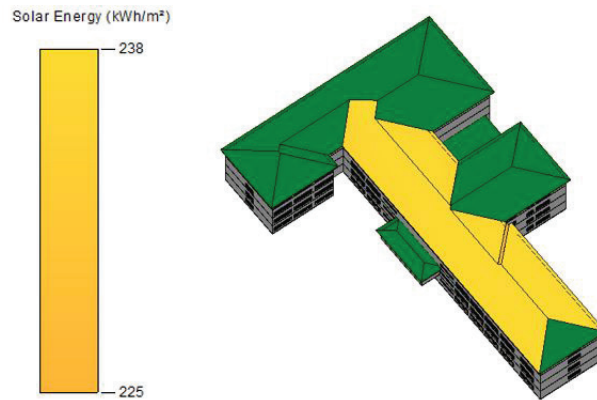


Figura 3. Área seleccionada para la instalación de módulos fotovoltaicos y escala de energía producida por m² anual con módulos de 16% de eficiencia.

La instalación de estos módulos generaría 361 661 kWh anuales según los resultados de la herramienta “Sun”.

Cajas de volumen variable y variadores de frecuencia para el sistema de climatización

La siguiente propuesta plantea la adaptación del actual sistema de distribución de volumen de aire constante (VAC) a uno más eficiente de volumen de aire variable (VAV); para esto, se requieren de sistemas de control, variadores de frecuencia en los motores de las manejadoras de aire (se incluirían también en las bombas de agua) y cajas de volumen variable en las derivaciones de los ductos de aire.

Se utilizó el programa VLT Energy Box 2 de Danfoss, empresa especialista en control, para determinar el ahorro energético que traería consigo la implementación de la propuesta. Para esto, se trabajó con una de las manejadoras de aire ubicadas en el edificio N°1 y con ayuda de los planos se completaron los campos presentes en la figura 4.

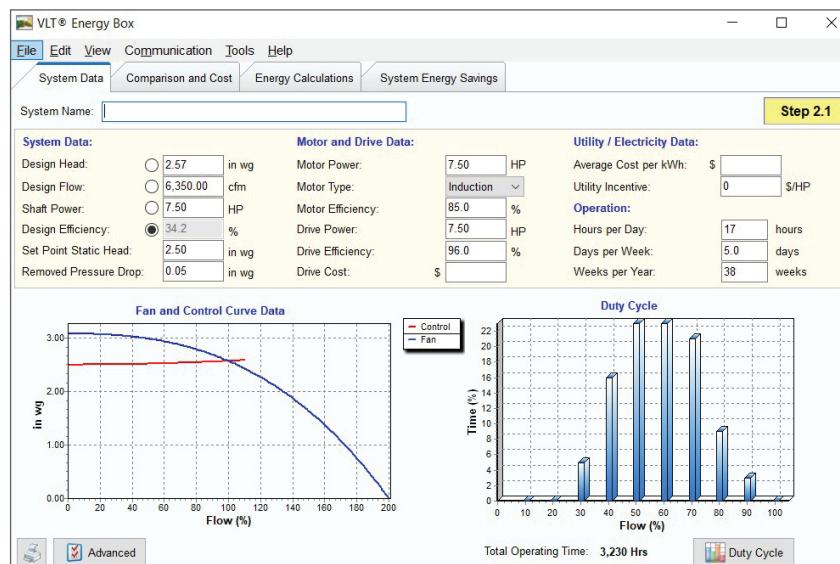
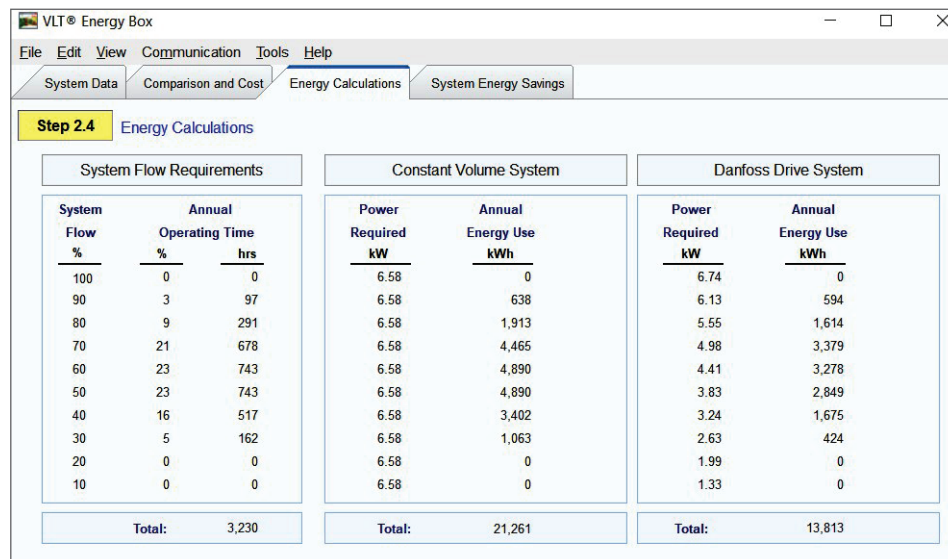


Figura 4. Ventana de configuración para ventiladores.

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos, donde se evidencia una clara ventaja en el consumo de electricidad del motor de la manejadora, reduciéndose en un 35% anual.



System Flow Requirements			Constant Volume System		Danfoss Drive System	
System Flow %	Annual Operating Time		Power Required kW	Annual Energy Use kWh	Power Required kW	Annual Energy Use kWh
	%	hrs				
100	0	0	6.58	0	6.74	0
90	3	97	6.58	638	6.13	594
80	9	291	6.58	1,913	5.55	1,614
70	21	678	6.58	4,465	4.98	3,379
60	23	743	6.58	4,890	4.41	3,278
50	23	743	6.58	4,890	3.83	2,849
40	16	517	6.58	3,402	3.24	1,675
30	5	162	6.58	1,063	2.63	424
20	0	0	6.58	0	1.99	0
10	0	0	6.58	0	1.33	0
Total:			21,261		13,813	

Figura 5. Comparativa del consumo eléctrico entre ventiladores operando a VAC Y VAV.

Se realizó el mismo procedimiento para el resto de las manejadoras de aire y bombas de agua fría y condensado, resultando un nuevo consumo de energía eléctrica anual para el edificio N°1 igual a 2 145 688 kWh, representando un ahorro de 14.10%.

Ventanas de doble cristal con cámara de aire

La conductividad térmica del aire a temperatura ambiente es prácticamente 30 veces menor a la del vidrio, por lo que una capa intermedia de aire en reposo de 1 cm de espesor tendría una resistencia térmica equivalente a la de una lámina de vidrio de 30 cm de espesor [12]. Por esta razón, resulta atractivo considerar la sustitución de las ventanas actuales por aquellas de doble cristal y cámara de aire. Se procedió entonces a incluir sobre el modelo en Revit ventanas con cristales de ¼ de pulgada cada uno y baja emisividad ($\epsilon = 0.05$), con coeficiente $U = 1.9873 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y con baja ganancia de calor ($\text{SHGC} = 0.26$). Al simular, se obtuvo un consumo de energía eléctrica igual a 2 397 613 kWh/año, representando una diferencia porcentual del 4.02%.

Ventilación del ático de la cubierta e instalación de barreras radiantes

Estudios han demostrado lo favorable que resulta ventilar áticos como medidas de eficiencia energética, entre estos se puede citar las investigaciones de Al-Obaidi *et al.* [13], donde se logra una reducción de temperatura de hasta 6.4°C entre un ático no ventilado y otro ventilado en Malasia, usando un extractor tipo turbina híbrido.

Se puede minimizar la ganancia de calor por radiación entre el techo interior y el tejado si se cubre al menos uno de los dos lados del ático con barreras radiantes, Figura 6.

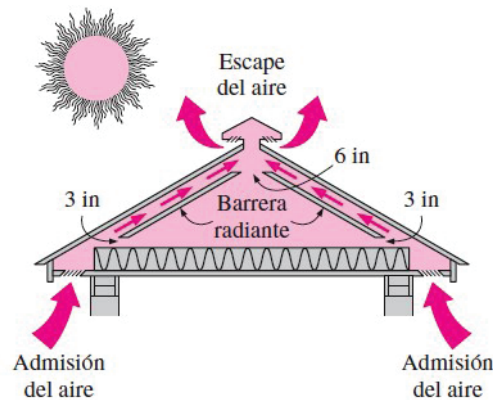


Figura 6. Funcionamiento de barrera radiante en ático. Fuente: [12]

Es importante destacar que la barrera radiante no representa por sí misma una resistencia térmica, por esta razón su uso va acompañado de material aislante. Para el caso de esta investigación, se usó aislante R-38 como parte del material del techo de ático y se volvió a simular el consumo energético. GBS arrojó un valor de 2 476 593 kWh anuales. El software Revit no cuenta con la posibilidad de simular el comportamiento energético usando barrera radiante, por esta razón el cálculo se limita al uso del aislante R-38.

Combinación de todas las propuestas

A partir del modelo del Edificio N°1 con las lámparas LED creado en Revit, se incluyeron en la configuración de energía las ventanas de doble cristal y el aislante R-38 en la cubierta, consiguiéndose un nuevo consumo de energía eléctrica igual a 1 880 639 kWh/año, figura 7.

Annual Energy	
Energy Use Intensity (EUI)	551 MJ / m ² / year
Electric	1,880,639 kWh
Fuel	1,378,463 MJ

Figura 7. Desglose del consumo de energía en el edificio N°1.

Aplicando la diferencia de consumo eléctrico derivado del uso de cajas de volumen variable y variadores de frecuencia para el sistema de climatización:

$$1\,880\,639 \frac{kWh}{año} - 179\,145 \frac{kWh}{año} - 173\,079 \frac{kWh}{año} = 1\,528\,415 \frac{kWh}{año}$$

La aplicación de todas las medidas de eficiencia energética reduciría en un 38.81% el consumo de energía eléctrica base de 2 497 912 kWh anuales en el Edificio N°1.

El cuadro 1 presenta un resumen de los efectos de las distintas propuestas de eficiencia energética, entre estos, el beneficio económico en términos de ahorro, usando la tarifa de 0.15268 B./ kWh presente en el pliego tarifario de ENSA para el primer semestre de 2020.

Cuadro 1. Ahorros energéticos y económicos de las propuestas de eficiencia energética.

Caso base (kWh/año)	Caso base (B/.)	Propuesta	ΔE_{elec} (kWh/año)	% ΔE_{elec}	Ahorro (B/. anual)
2 497 912	381 381.20	Lámparas LED	484 219	19.38	73 930.56
		Módulos PV en la cubierta 16%	-	-	55 218.40
		Módulos PV en la cubierta 20.4%	-	-	70 403.34
		VFDs + Cajas VAV	352 224	14.10	53 777.56
		Ventanas de doble cristal	100 299	4.02	15 313.65
		Ventilación de ático de la cubierta + barrera radiante*	21 319	0.85	3 254.98
		Combinación de todas las propuestas (módulos 16%)	969 497	38.81	202 241.20
		Combinación de todas las propuestas (módulos 20.4%)	969 497	38.81	218 426.14

* Cálculo basado únicamente en la aplicación del aislante R-38.

Como se puede apreciar el cuadro 1, el ahorro anual para el caso de módulos al 16% corresponde a 203 241.20 Balboas (equivalentes en dólares americanos), lo anterior permitiría la contratación de personal nuevo de investigación con grado de maestría y/o doctorado por el orden de once nuevos investigadores con grado de maestría o seis nuevos investigadores con grado de doctorado respectivamente. Para el caso de módulos al 20.4%, las estimaciones corresponden a doce nuevos investigadores con grado de maestría y/o siete nuevos investigadores con grado de doctorado respectivamente. Las cantidades de 203 241.20 y 218 426.14 dólares americanos se pueden comparar muy bien con el capital correspondiente a la adjudicación de dos proyectos del programa marco de Convocatoria Pública de Fortalecimiento a Equipamiento e Instrumentación Especializado para Actividades de I+D (EIE) de la SENACYT [14]. Otro uso al capital ahorrado puede dársele al pago correspondiente de las tasas de acreditación o reacreditación de por lo menos cinco carreras de grado de la UTP, a razón de 35 000 dólares americanos aproximadamente.

Evaluación de la huella de carbono

Para evaluar el beneficio ambiental que traería consigo la implementación de todas las propuestas de eficiencia energética en el edificio N°1, se calcularon con la ec.(3) las toneladas de CO₂ equivalentes que emite el edificio durante su operación y las que dejarían de liberarse a la atmósfera.

$$\frac{t_{CO_2e}}{año} = \frac{E_c \times F_e}{1000} \quad (3)$$

Donde tCO₂e son las toneladas equivalentes de CO₂, E_c es la energía consumida por el edificio en kWh/año, F_e es un factor de emisión por generación en tCO₂e/MWh y 1000 es el factor de conversión de kWh a MWh.

El factor de emisión utilizado fue 0.224 tCO₂e/ MWh [15], el cual incluye la generación por energías térmicas convencionales y renovables. Se optó por usar el factor combinado atendiendo a la última matriz energética de generación de electricidad de Panamá [16].

Las toneladas de CO₂ equivalentes emitidas por el edificio N°1 durante su operación son:

$$\frac{t_{CO_2e}}{\text{año}} = \frac{2\,497\,912 \frac{kWh}{\text{año}} \times 0.224 \frac{tCO_2e}{MWh}}{1000} = 559.53$$

Con todas las propuestas de eficiencia energética aplicándose, incluyendo los 361 661 kWh anuales de generación fotovoltaica, se tendría una reducción de las emisiones de CO₂ equivalentes igual a:

$$\frac{t_{CO_2e}}{\text{año}} = \frac{\left(2\,497\,912 \frac{kWh}{\text{año}} - 1\,528\,415 \frac{kWh}{\text{año}} + 361\,661 \frac{kWh}{\text{año}}\right) \times 0.224 \frac{tCO_2e}{MWh}}{1000} = 298.18$$

Con módulos de 20.4% de eficiencia, con una generación de 461 117 kWh/año, se tendría una reducción en emisiones de CO₂ de 320.46, lo que representa un 57.27% menos.

Haciendo un análisis comparativo con las toneladas de CO₂ anuales generadas por la Línea 1 del Metro de Panamá durante el periodo 2015 al 2017[17][18] y los escenarios de emisiones de CO₂ del Edificio N°1 sin medidas de ahorro energético y con estas, es posible apreciar lo indicado en el cuadro 2.

Cuadro 2. Comparativa entre emisiones de CO₂ del metro de Panamá y el edificio N°1.

Aspecto	2015	2016	2017
Toneladas anuales de CO ₂ de la línea 1 del Metro de Panamá[17][18]	12 505	11 062	12 505
Toneladas mensuales de CO ₂ de la línea 1 del metro de Panamá[17][18]	1 042	922	1 042
Toneladas anuales de CO ₂ del edificio N°1 sin ahorro	559.53	559.53	559.53
Toneladas anuales de CO ₂ del edificio N°1 con ahorro (módulos 16%)	261.35	261.35	261.35
Relación porcentual de las toneladas anuales de CO ₂ del edificio N°1 sin ahorro con las toneladas anuales de la línea 1 del metro de Panamá	4.47%	5.06%	4.47%
Relación porcentual de las toneladas anuales de CO ₂ del edificio N°1 con ahorro (módulos 16%) con las toneladas anuales de la línea 1 del metro de Panamá	2.09%	2.36%	2.09%

El total de emisiones de CO₂ anuales del edificio N°1 sin medidas de ahorro energético corresponde al 4.47% de las emisiones anuales de CO₂ de la línea 1 del metro de Panamá para los años 2015 y 2017; y a un 5.06% para el año 2016. El total de emisiones de CO₂ anuales del edificio N°1 con las medidas de ahorro energético corresponde al 2.09% de las emisiones anuales de CO₂ de la línea 1 del metro de Panamá para los años 2015 y 2017; y a un 2.36% para el año 2016. Si se hace la comparación para los años 2016 y 2017, con respecto a las toneladas mensuales de CO₂ de la línea 1 del metro de Panamá, se puede apreciar que el total de 559.53 de emisiones anuales de CO₂ del edificio n °1 (sin ahorro) corresponde al 53.70% y 60.68% de las emisiones mensuales de CO₂ de la línea 1 del metro de Panamá, es decir, esto correspondería a las emisiones de dos semanas de operaciones de la línea 1 del metro de Panamá aproximadamente. En relación con el total de 261.35 de emisiones anuales de CO₂

del edificio N°1 (con ahorro) corresponde al 25.08% y 28.34% de las emisiones mensuales de CO₂ de la línea 1 del metro de Panamá, es decir, esto correspondería a las emisiones de una semana de operaciones de la línea 1 del metro de Panamá aproximadamente.

Conclusiones

El resultado del cálculo teórico del consumo de energía eléctrica del edificio N°1 indica que el sistema de climatización es el conjunto más demandante (72.90% del total). Por su parte, Revit y Green Building Studio resultaron ser herramientas muy confiables para simular el comportamiento energético de la edificación, obteniéndose un consumo anual de 2 497 912 kWh. La sustitución de las lámparas fluorescentes por las de tecnología LED resultaron ser la propuesta que alcanzó un ahorro energético más significativo con un 19.38%, seguido de las adaptaciones al sistema de climatización con un 14.10%. La aplicación de la combinación de todas las propuestas descritas significaría un potencial ahorro en el consumo eléctrico del edificio de 38.81%. En términos económicos, se alcanzarían reducciones en la factura hasta de B/. 218 426.14 anuales y una disminución del 57.27% de emisiones de toneladas equivalentes de CO₂. El dinero que se ahorraría con la implementación de todas las propuestas de eficiencia energética tendría un impacto importante en el ámbito de la investigación en la UTP, al poder contratarse profesionales con títulos de maestría y doctorado y así aportar en la escalada de la universidad en rankings internacionales. De igual forma, podría aprovecharse el capital en proyectos de innovación e interés científico. Adicionalmente, el análisis comparativo con respecto a las emisiones de CO₂ de la línea 1 de metro de Panamá arrojó que con el total de 261.35 de emisiones anuales de toneladas de CO₂ del edificio N°1 (con ahorro) corresponde al 25.08% y 28.34% de las emisiones mensuales de CO₂ de la línea 1 del metro de Panamá, es decir, esto correspondería a las emisiones de una semana de operaciones de la línea 1 del metro de Panamá aproximadamente.

Referencias

- [1] Secretaría Nacional de Energía, *Plan Energético Nacional 2015-2050*, no. 6–348. Panamá: Gaceta Oficial Digital, 2016, p. 348.
- [2] D. R. Rico, “Los beneficios de la eficiencia energética: su alcance y limitaciones,” *FIDE*, p. 48, 2019.
- [3] R. Ramírez Talán and J. Toro González, “Eficiencia energética y su medición,” *FIDE*, 2019.
- [4] J. Randolph and G. M. Masters, “Energy Efficiency for Buildings,” *Energy Sustain.*, vol. 33, no. 1, pp. 173–213, 2018, doi: 10.5822/978-1-61091-821-3_6.
- [5] M. S. Morales Flores, “Building Performance evaluation using Autodesk Revit for optimising the energy consumption of an educational building on subtropical highland climate: A case of study in Quito,” 2016.
- [6] P. Singh and A. Sadhu, “Multicomponent energy assessment of buildings using building information modeling,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 49, p. 101603, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.SCS.2019.101603.
- [7] H. Al Habibi, “ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ENERGY PERFORMANCE FOR A BUILDING IN CSUS CAMPUS,” California State University, 2019.
- [8] K. Carrizo, “Inventario del consumo de energía para evaluar alternativas de ahorro energético en el edificio 2 ‘Postgrado’ del Campus Víctor Levi Sasso,” Universidad Tecnológica de Panamá, 2021.
- [9] B. González, “Inventario del consumo de energía para evaluar alternativas de ahorro energético en el edificio N°3 del Campus Víctor Levi Sasso,” Universidad Tecnológica de Panamá, 2021.
- [10] C. Jaramillo, “Informe consumo eléctrico UTP 2018,” Ciudad de Panamá.
- [11] JTIA, *Gaceta Oficial N°22.263*. Panamá, 1993, p. 4.
- [12] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, 5th ed. McGraw Hill, 2014.

- [13] K. M. Al-Obaidi, M. Ismail, and A. M. Abdul Rahman, "A comparative study between unvented and vented attics powered by the hybrid turbine ventilator in Malaysian houses," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 148–160, 2016, doi: 10.1080/14786451.2013.873801.
- [14] SENACYT, "Convocatoria Pública de Fortalecimiento a Equipamiento e Instrumentación Especializado para Actividades de I+D (EIE) 2019," *Convocatoria digital*, 2021. <https://www.senacyt.gob.pa/convocatoria-publica-de-fortalecimiento-a-equipamiento-e-instrumentacion-especializado-para-actividades-de-id-eie-2019-2/> (accessed Sep. 16, 2021).
- [15] E. Sempris, A. Domínguez, R. Gutiérrez, and J. Young, "Primer informe de Panamá ante la CMNUCC," 2017.
- [16] "Generación eléctrica. Secretaría Nacional de Energía." .
- [17] A. Berbey-Alvarez, J. Guevara-Cedeño, H. Alvarez, and J. Sanz Bobi, "Panama Metro Bus System and Metro Line 1: An externalities analysis of CO₂ emissions spectre.," in *Conference: 2017 International Conference in Engineering Applications Track: Energy and Sustainability in Small Developing Economies, At In Funchal, Madeira Island, July 10-13, 2017, Volume: In Funchal, Madeira Island, July 10-13, 2017.*, 2017, p. 2017.
- [18] A. Berbey-Alvarez, J. Guevara-Cedeño, H. Alvarez, and F. Mihailovs, "Panama metro line 1: Analysis of CO₂ emissions from 2015 to 2017. Principles for an eco-transportation city," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 149, no. March, pp. 467–474, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.01.164.

Desarrollo de Plataforma UAS de Ala Fija con ascenso/descenso vertical para aplicaciones fotogramétricas

Development of Vertical Takeoff and Landing fixed-wing UAS Platform for Photogrammetry Applications

Kenny Lee-Quirós¹, Juan Gabriel Rodríguez-Rivera²,
Amit Ferencz-Appel³, Sergio Arriola-Valverde⁴,
Jorge Umaña-Soto⁵, Renato Rimolo-Donadio⁶

Fecha de recepción: 18 de setiembre, 2021

Fecha de aprobación: 22 de marzo, 2022

Lee-Quirós, K; Rodríguez-Rivera, J.G; Ferencz-Appel, A; Arriola-Valverde, S; Umaña-Soto, J; Rimolo-Donadio, R. Desarrollo de plataforma UAS de Ala Fija con ascenso/descenso vertical para aplicaciones fotogramétricas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 152-162.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5872>

1 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: kleeq24@gmail.com

2 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gabrielrodriguez@ieee.org

3 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ferami3@gmail.com

4 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: sarriola@tec.ac.cr

5 Ticohobbies de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jorge@ticohobbies.com

6 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rimolo@tec.ac.cr

Palabras clave

Ala fija; despegue y aterrizaje vertical; drones; fotogrametría; sensores remotos; sistema aéreo no tripulado.

Resumen

En este artículo se describe el proceso de desarrollo de una plataforma de ala fija con capacidad de despegue/aterrizaje vertical (VTOL) para aplicaciones fotogramétricas a partir del controlador abierto con autopiloto Pixhawk 2. Se explica la funcionalidad general y los resultados obtenidos con la integración de la plataforma, así como los resultados obtenidos con vuelos de prueba. El prototipo desarrollado fue capaz de ejecutar misiones autónomas y obtener imágenes georreferenciadas con calidad fotogramétrica para la conformación de productos tales como ortomosaicos o modelos de elevación digital (DEM).

Keywords

Drones; fixed wing; photogrammetry; remote sensors; unmanned aerial system; vertical take-off and landing.

Abstract

This paper describes the development of a fixed-wing vertical-takeoff-and-landing (VTOL) platform for photogrammetric applications with the open autopilot Pixhawk 2. The general functionality and the results obtained with the integrated platform are explained, as well as the results obtained through test flights. The developed prototype was able to execute autonomous missions and obtain georeferenced images with good photogrammetric quality for the conformation of products such as orthomosaics digital elevation models (DEMs).

Introducción

La Sociedad Americana para la Fotogrametría y el Sensores Remotos (ASPRS) define a la fotogrametría como “el arte, ciencia y tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y el ambiente mediante procesos de mediciones e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos” [1]. La fotogrametría se descompone etimológicamente como “foto” que quiere decir luz, “gram” que es dibujo y “metría” que es la medición.

La intención de desarrollar una plataforma VTOL de ala fija surge a partir de las necesidades del Laboratorio de Fotogrametría (UASTEC), del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), de contar con aeronaves capaces de cubrir áreas de terreno más extensas. Actualmente, dicho laboratorio dispone de sistemas multirrotores como el Matrice 600 de DJI, que tiene una autonomía cercana a los 25 minutos y con la es posible llevar a cabo mapeos con coberturas en el orden de las decenas de hectáreas. En una misión a una altitud de 100 metros, por ejemplo, es posible abarcar alrededor de 20 hectáreas de aproximadamente.

Las plataformas multirrotor tienen la característica de tener un despegue de forma vertical, que les permite despegar en espacios pequeños, además son altamente maniobrables debido al control fino que se puede realizar al variar las velocidades de los diferentes motores con los que cuentan, lo que permite volar a baja altura y alcanzar altas resoluciones espaciales (cercana

a 1 cm/pix) con los sensores de imagen a bordo. Sin embargo, esto genera gran consumo de energía debido a que se debe mantener todos los motores girando a alta velocidad a lo largo todo el vuelo.

Las plataformas de ala fija proporcionan mayor autonomía de vuelo, y recientemente en UASTEC se han explorado algunas alternativas [2]-[6]. Por ejemplo, para un sobrevuelo de alrededor de 100 hectáreas se requirieron 17 minutos a una altitud de 180 metros [6]. Las plataformas de ala fija tienen la ventaja respecto a el consumo de energía, ya que la sustentación es generada por las alas y no por los motores; además, poseen una mejor aerodinámica y menor cantidad de motores. La principal desventaja que presenta es que los despegues y aterrizajes son más complejos o imposibles cuando no se dispone de un área libre para realizarlos.

Las plataformas VTOL ofrecen una solución intermedia al hibridizar las características de los multirrotores para el despegue y aterrizaje, y las de ala fija de volar bajo el principio de sustentación tradicional que utilizan aeronaves con alas. Esto permite realizar las maniobras de despegue y aterrizaje de forma vertical, como lo realizan los multirrotores, y durante el vuelo se realiza la transición al modo ala fija, que le permite mejorar la autonomía y mapear amplias zonas de terreno.

En este trabajo se detalla el desarrollo de una plataforma VTOL, donde se considera el diseño eléctrico, la integración de éste a un cuerpo de aeronave, su configuración y ejecución de misiones fotogramétricas autónomas utilizando insumos de hardware y software abiertos. La información presentada a continuación fue parte de un proyecto final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica [7].

Desarrollo de una plataforma VTOL de ala fija

En el mercado existen diferentes plataformas VTOL, pero estas usualmente tienen un costo elevado y, en general, es difícil adaptarles nuevos sensores y funcionalidades. Este proyecto busca implementar una plataforma UAS VTOL de bajo costo y configurable, basado en un controlador de código abierto. El trabajo se desarrolló utilizando el Pixhawk 2 como controlador central de vuelo y autopiloto, sobre un cuerpo de aeronave del tipo *Skywalker* con cuatro alerones y tres rotores, dos de los cuales se ubican en las alas y son móviles para transicionar entre el modo ala fija y multirrotor.

En el diagrama de la figura 1 se muestra la interconexión de los diferentes bloques del sistema electrónico y mecánico que componen la plataforma VTOL de ala fija, y en la figura 2 se muestra físicamente el resultado de la integración de la aeronave. Cada uno de los bloques se agrupa en seis etapas centrales, a saber: controlador central, sección de sensores, de actuadores, comunicación por radio frecuencia (RF), sección de potencia y sección de alimentación, las cuales se describen en más detalle a continuación. El proceso de selección de componentes y sus especificaciones se pueden consultar en la referencia [7].

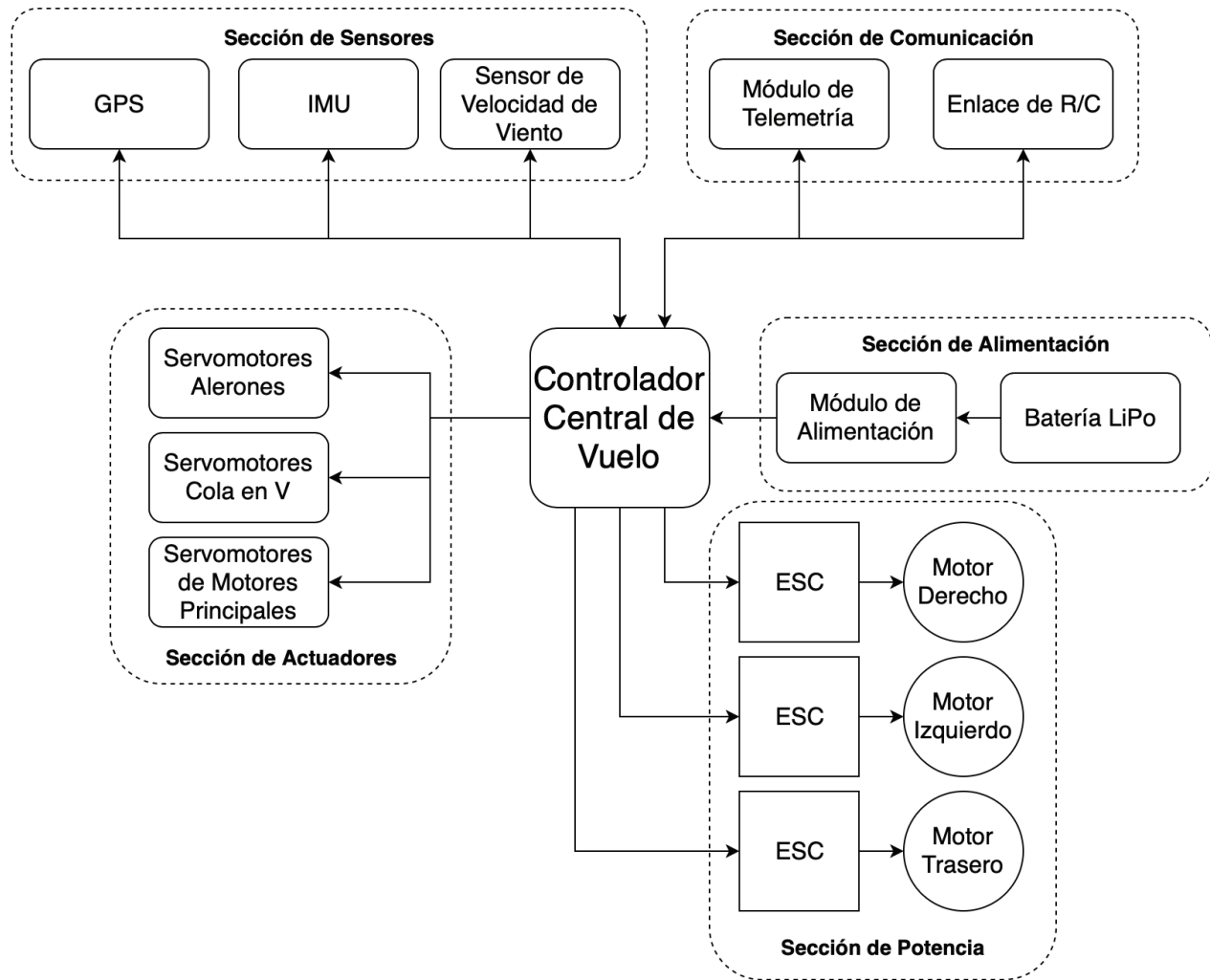


Figura 1. Diagrama de interconexión de bloques del diseño de la plataforma VTOL.

Controlador de vuelo

El controlador de vuelo es la unidad central de procesamiento de la aeronave, encargada de manejar cada uno de los componentes, entre ellos leer e interpretar los datos obtenidos de los periféricos (sensores) y tomar acciones mediante los actuadores (servomotores y motores). El controlador Pixhawk 2 [8] se comunica con los periféricos mediante diferentes protocolos de comunicación, como I²C (para el sensor de velocidad de viento), UART (para el receptor GPS y la telemetría) y SPI (para el IMU). Y para los actuadores se comunica mediante señales de modulación por ancho de pulso (PWM). Es importante destacar que este controlador tiene la capacidad de realizar misiones autónomas, las cuales se puede programar desde el software de control asociado, llamado *Mission Planner*.

Sección de sensores

Los sensores son la forma en que el controlador puede estar consciente del entorno a la hora de volar. Los sensores que se utilizan en la plataforma son el receptor para el sistema de posicionamiento global (GPS), modelo Here de la marca Hex [9]; la unidad de medición inercial (IMU), que incluye un acelerómetro LSM303 [10], un giroscopio L3GD20 [11] y un barómetro

MS5611 [12], y que vienen incorporados dentro del controlador Pixhawk 2; y el sensor de velocidad de viento, modelo MS5525 [13]. Estos le brindan al controlador información de orientación, posición y sustentación de la aeronave durante la ejecución de una misión.

Sección de actuadores

Los movimientos para controlar el desplazamiento de la aeronave en modo de ala fija se realizan mediante servomotores. Las partes móviles de la plataforma son los alerones, tanto los de las alas como los de la cola, y además los servomotores que realizan un movimiento de 90 grados para la transición de los motores en las alas entre el modo multirrotores y el modo de ala fija y viceversa. Se utilizan servomotores EMAX ES3004 [14] para los alerones de las alas y la cola, los cuales presentan un torque de estancamiento (Stall torque) máximo de 3.5 kg×cm; para los servomotores de las alas se utilizó el modelo RDS3115 [15] que cuenta con un torque de estancamiento de 15 kg×cm.

Sección de comunicación

Para la operación de la aeronave, se debe establecer enlaces de comunicación entre el controlador de la aeronave y una estación en tierra (*Ground Control Station*, GCS), y entre el controlador de la aeronave y el control remoto. Ambos enlaces tienen diferente propósito y forma de comunicarse. Para la comunicación entre la aeronave y el control remoto se utiliza un enlace de 2.4 GHz con una modulación PPM de ocho canales entre el emisor y el receptor, utilizando el modelo de transceptor D4R-II de FrySky [16] y el control remoto modelo FS-TH9X [17]. Entre el control remoto y el controlador a bordo se intercambian comandos para controlar los alerones, transición, velocidad de motores; además, se pueden monitorizar algunas señales según la configuración deseada. Para el caso del enlace de telemetría, este permite intercambiar información entre el software en la GCS y el controlador a bordo, para por ejemplo definir la secuencia de comandos para mover los alerones y controlar la potencia aplicada para seguir una trayectoria predefinida. Además, se puede obtener información de sensores, las condiciones de orientación (posición tridimensional, velocidad) y estado general del controlador de vuelo de la aeronave. Este enlace se realiza mediante un enlace a 433 MHz, el cual es una banda libre aficionada en Costa Rica [18].

Sección de potencia

Los motores que se utilizan para aplicaciones de plataformas no tripuladas son principalmente los motores sin escobillas, los cuales tienen una alta eficiencia en el consumo de energía, pero un costo más elevado. Para que una aeronave pueda elevarse con normalidad, es necesario tener un empuje total de los motores que sea al menos el doble del peso total de la aeronave. También es de importancia conocer la constante *KV* del motor, la cual indica una aproximación de las revoluciones por minuto del motor por Voltio aplicado. Los motores utilizados para la plataforma tienen 12 polos con una constante $KV = 520$ para los motores de las alas y $KV = 400$ para el motor de la cola.

Sección de alimentación

Esta sección se encarga de proporcionar energía a todos los componentes de la plataforma; para ello se utilizan baterías tipo LiPo (Polímero de Litio), que presentan un peso adecuado y una buena tasa de descarga (XC). Este tipo de batería ofrece un balance positivo para la relación peso/potencia, comparado con otros tipos de baterías como las de NiMH, por ejemplo [19]. Para el caso de la plataforma VTOL desarrollada, se utilizó una batería LiPo de 6 celdas, con capacidad (C) de 8000 mAh, con la que se fija una tensión nominal de 22.2 V. La capacidad de la batería es importante para el correcto funcionamiento de los motores, ya que

estos demandan gran cantidad de potencia para el despegue y aterrizaje de la plataforma en modo multirroto. La tasa de descarga permitida para una batería se mide en múltiplos de su capacidad nominal (XC) e indica la corriente máxima que la batería puede entregar. Para la batería utilizada se tiene un valor de 10C, que indica que la batería puede entregar una corriente máxima de $10 \cdot 8000 \text{ mAh} = 80 \text{ A}$.

Implementación y Validación de la Plataforma VTOL

A continuación se muestra la implementación de la plataforma VTOL, la cual se realizó utilizando un fuselaje de un Nimbus 1800 [20], originalmente una estructura para ala fija que fue adaptada. La integración final de la plataforma se muestra en la figura 2.

Al fuselaje se le agregó el control electrónico, los motores, los servomotores, el receptor GPS, el Pitot y se desarrollaron varias piezas en impresión 2D/3D: soportes para la cola y el motor trasero; además, se creó una base para poder colocar el controlador de vuelo, Pixhawk 2, como se muestra en la figura 3.



Figura 2. Plataforma VTOL de ala fija implementada.



Figura 3. Controlador de Vuelo, Pixhawk 2, fijado dentro del fuselaje de la plataforma.

Posteriormente se realizó la programación del controlador mediante el software *Mission Planner* [21], con el cual se instala el firmware ArduPlane [22] y se programa el controlador. Para programar el controlador de vuelo, se modifican los parámetros que controlan diferentes aspectos que controlan el funcionamiento de la plataforma, desde la estructura en términos de cantidad y configuración de los motores, hasta tasas de ascenso, descenso, ajustes del control de estabilidad de la aeronave, ajuste de los servomotores, entre otros. Algunos de los parámetros más importantes para la plataforma se encuentran resumidos en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros de configuración principales de la plataforma VTOL en Mission Planer.

Parámetro	Valor	Descripción
Q_ENABLE	1	Habilita moto QuadPlane
Q_FRAME_CLASS	7	Frame: Tricopter (3 Motores)
Q_FRAME_TYPE	1	Orientación de Motores: X
Q_TILT_TYPE	2	Yaw de forma Vectorial

Una vez consolidada la plataforma, se realizaron diferentes pruebas, primero a nivel de subsistemas dentro del Laboratorio, y posteriormente en campo con pruebas manuales y autónomas (figura 4) en misiones fotogramétricas programadas, para un total de 14 pruebas de campo.

A continuación, se muestran los resultados de una de las misiones autónomas. En esta misión se cubrió un área aproximada de 30 hectáreas de terreno, que corresponden al sector este del campus tecnológico central del ITCR en Cartago con una duración aproximada de nueve minutos y medio, con un consumo de un 40% de una batería LiPo 6S de 8000 mAh. El plan de vuelo se describe en la Figura 5, que consistió en un sobrevuelo a 100 metros de altitud, con una separación entre líneas de 40 metros y un traslape vertical y horizontal del 80%. Se aplicó el salto de dos líneas como forma de vuelo para conformar la ruta, con el fin de tener suficiente flexibilidad espacial para realizar virajes más amplios y de esta forma no exigir a la plataforma realizar virajes muy abruptos, los cuales pueden ser peligroso por la inestabilidad inducida. Con este acercamiento se logra conservar la separación de líneas fijada sin mayores problemas.



Figura 4. Despegue de la plataforma VTOL en misión autónoma.

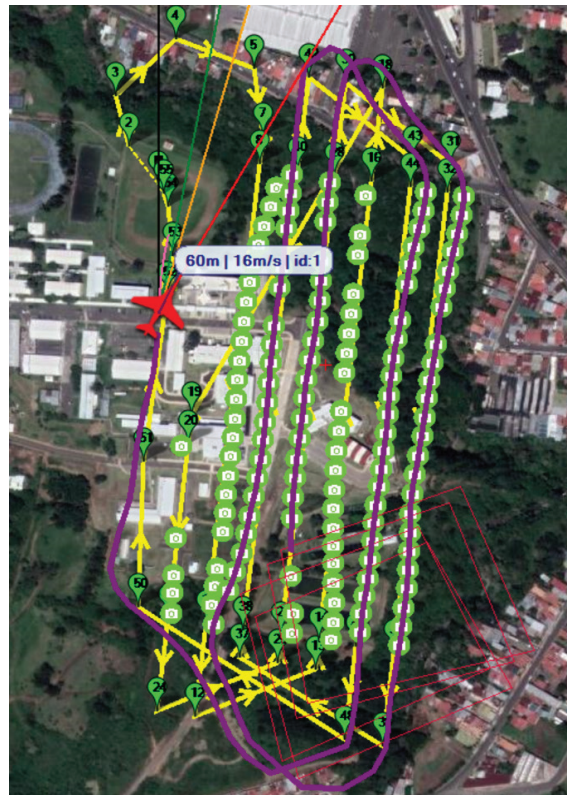


Figura 5. Plan de vuelo y misión ejecutada por plataforma VTOL.

Para el caso de la misión mostrada en la figura 5, la aeronave estuvo expuesta a viento cruzado, ya que la trayectoria era de norte-sur, pero el viento estaba en dirección oeste-este. Por esta razón se observa que la nariz apunta ligeramente en dirección al viento, para compensar el arrastre.

Se utilizó para la toma de imágenes una cámara Sony A5100 adaptada para uso en UAS (sin interfaz humana), de 24 megapíxeles y un lente de 16 mm, con la cual se obtuvieron 157 imágenes para el análisis fotogramétrico. Mediante el software *Agisoft Metashape* 1.5.3 [23] se realizó el procesamiento de las imágenes y se logró verificar que la calidad de las imágenes es superior a 0.6. Este factor es evaluado por el software de fotogrametría, e indica la nitidez de las imágenes, en un rango entre cero y uno, requiriéndose normalmente valores sobre el umbral de 0.6 para lograr una alineación exitosa de las imágenes.



Figura 6. Nube densa de puntos generada en Agisoft Metashape. (524 896 075 puntos).

La alineación de las imágenes se realiza con el programa de procesamiento, y está basado en algoritmos de visión por computadora tales como el SfM (Structure from Motion) [24] - [27] y el SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [26], que buscan encontrar puntos clave y puntos coincidentes entre el conjunto de imágenes. Este procedimiento genera la proyección de los puntos en un espacio tridimensional para conformar la nube de puntos dispersa de aproximadamente 160 000 puntos.

La nube densa de puntos se genera a partir de la nube dispersa, la cual consiste en un modelo tridimensional detallado del terreno sobrevolado, como se ilustra en la figura 6. Esta nube típicamente se genera con algoritmos MVS (Multi View Stereo) [27], el cual busca distinguir e inferir diferentes puntos de vista de diferentes imágenes respecto a un punto en común entre las fotografías. A partir de los píxeles coincidentes de las imágenes en 2D para conformar la nube dispersa, se busca interpolar la posición correspondiente de otros puntos y así crear un espacio tridimensional con mayor cantidad de información. En este caso, la nube de puntos densa tuvo un total de 524 896 075 puntos.

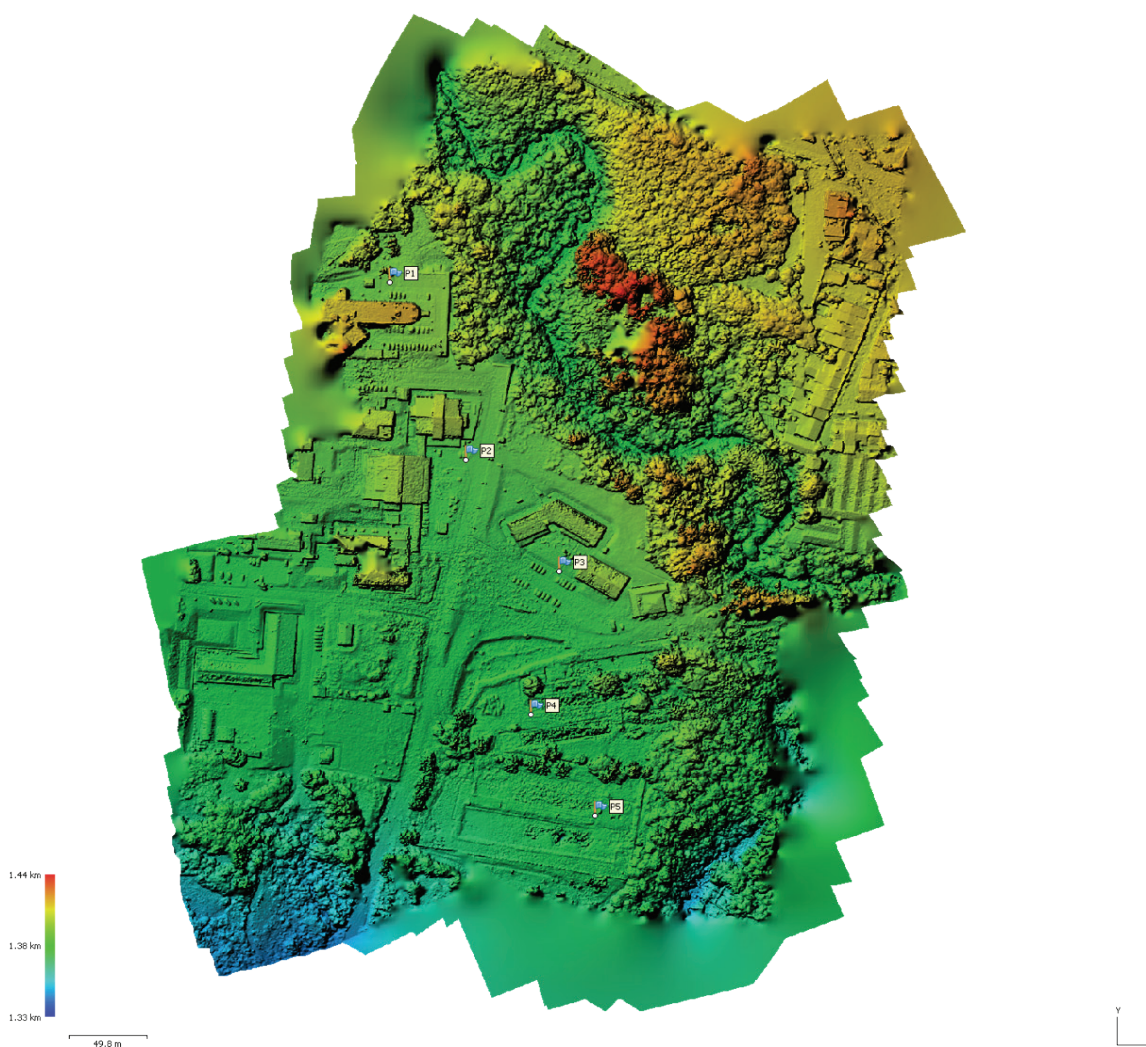


Figura 7. Modelo digital de elevación (DEM) generado mediante Agisoft Metashape. Resolución: 2.8 cm/píxel.

Finalmente, se generan los productos fotogramétricos a partir de la nube densa y el modelo mallado, por ejemplo, modelos digitales de elevación (DEM) u ortomosaicos. Para la zona en estudio, el DEM se muestra en la figura 7, donde se observa el relieve del área sobrevolada,

donde la escala de altitud varía de 1330 msnm (en azul) a 1440 msnm. Se utilizaron 5 puntos de referencia geográficos (*Ground Control Points, GCPs*) y se alcanzó una resolución espacial de 2.8 cm/pixel, con errores RMS en las componentes X, Y, Z de los GCP inferiores a 2.03 cm. Se utilizó un sistema de proyección CRTM-05 con Datum WGS-84.

Conclusiones y Recomendaciones

En este artículo se describió el desarrollo de un UAS del tipo VTOL y se demostró que la plataforma es capaz de ejecutar misiones fotogramétricas programadas de forma autónoma. Se logró programar misiones de vuelo, de las que se obtuvieron procesamientos fotogramétricos de buena calidad y alta resolución (2.8 cm/pixel). El factor de calidad obtenido de las imágenes fue superior a 0.7, para la escala del programa de Agisoft Metashape, y se logró alinear el 100 % de las imágenes.

Trabajo a futuro debe depurar las metodologías para toma de datos, protocolos de seguridad, así como extender el trabajo para poder integrar diversos sensores de imagen, tanto en el área visible como en bandas no visibles.

Referencias

- [1] The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, "What is ASPRS?" Obtenido de: <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html>
- [2] E. Gutierrez-Leiva, "Desarrollo de plataforma UAS para aplicaciones de fotogrametría", Proyecto Final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Cartago, 2017.
- [3] E. Gutierrez-Leiva, Sergio, S. Arriola-Valverde, L. A. Chavarria-Zamora y R. Rimolo-Donadio, "Desarrollo de una Plataforma de Ala Fija para aplicaciones en Fotogrametría", Tecnología en marcha, vol. 31, n° 4, pp. 133-141, 2018.
- [4] A. Ferencz-Appel, "Methodology For The Generation of Autonomous Photogrammetric Missions with fixed-wing UAS Platforms", Proyecto Final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), 2019.
- [5] A. Ferencz-Appel, H. García de Marina, S. Arriola-Valverde, R. Rimolo-Donadio, "Metodología para la Implementación de Misiones Fotogramétricas Autónomas con Plataformas UAS de Ala Fija. Tecnología en marcha, artículo enviado, 2019.
- [6] N. Chinchilla Bravo, "Observe desde el aire el campus del TEC en alta resolución." Obtenido de: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2019/01/31/observe-aire-campus-tec-alta-resolucion>
- [7] K. Lee Quirós. "Desarrollo de plataforma VTOL de ala fija para aplicaciones fotogramétricas," Proyecto de Graduación de Licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2019.
- [8] "Pixhawk 2." [Disponible en línea, setiembre 2019]: https://docs.px4.io/v1.9.0/en/flight_controller/pixhawk-2.html
- [9] "Here GNSS GPS – Hex Technology" [Disponible en línea, setiembre 2019]: <http://www.hex.aero/?product=here-gnss>
- [10] "LSM303DLHC: Ultra-compact high-performance eCompass module: 3D accelerometer and 3D magnetometer." [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/DM00027543.pdf>
- [11] "L3GD20H: MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope" [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l3gd20h.pdf>
- [12] "MS5611-01BA03: Barometric Pressure Sensor, with stainless steel cap" [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-BLPS0036.datasheet.pdf>
- [13] "MS5525: Digital Small Outline Pressure Sensor" [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-BLPS0003.datasheet.pdf>
- [14] "EMAX ES3004 Metal Gear Analog Servo For RC Airplane" [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.aliexpress.com/item/32959450326.html>

- [15] “RDS3115 Metal Gear Digital Servo” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.autobotic.com.my/robot-servo-rds3115-metal-gear-digital-servo-180-degree>
- [16] “D4R-II Receiver - FrSky” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.frsky-rc.com/product/d4r-ii/>
- [17] “FS-TH9X Transmitter - Flysky” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.flysky-cn.com/fsth9x>
- [18] “Alcance no. 110, May 24, 2017”. [Disponible en línea, setiembre 2019]: https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2017/05/24/ALCA110_24_05_2017.pdf
- [19] J. Salt, “Getting the most out of your LiPo batteries,” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.rche-licopterfun.com/lipo-batteries.html>
- [20] “Nimbus 1800 Long Range RC FPV Plane.” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.foxtechfpv.com/nimbus-1800-fpv-plane-frame.html>
- [21] “Mission Planner – ArduPilot” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <http://ardupilot.org/planner/>
- [22] ArduPilot, “APM: Plane”. [Disponible en línea, setiembre 2019]: <http://ardupilot.org/plane/index.html>
- [23] “Agisoft Metashape” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/>
- [24] Humboldt State University. “Structure from Motion” [Disponible en línea, setiembre 2019]: http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson8-2/SfM.html
- [25] N. Micheletti, J. H. Chandler y S. Lane. “Structure from Motion (SfM) Photogrammetry” [Disponible en línea, setiembre 2019]: https://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.2.2_sfm.pdf
- [26] E. Nissen, J. R. Arrowsmith y Chris Crosby. “Introduction to Structure-from-Motion” [Disponible en línea, setiembre 2019]: <https://kb.unavco.org/kb/file.php?id=810>
- [27] Y. Furukawa y C. Hernández. “Multi-View Stereo: A Tutorial” [Disponible en línea, setiembre 2019]: http://carlos-hernandez.org/papers/fnt_mvs_2015.pdf

Importancia de los coeficientes de uniformidad en las operaciones agrícolas asistidas por maquinaria (Nota técnica)

Importance of uniformity coefficients in machine-assisted agricultural operations (technical note)

Natalia Gomez-Calderón¹, Fernando Watson-Hernández², Milton Solórzano-Quintana³

Fecha de recepción: 23 de noviembre, 2021
Fecha de aprobación: 2 de abril, 2022

Gomez-Calderón, N., Watson-Hernández, F., Solórzano-Quintana, M. Nota técnica: importancia de los coeficientes de uniformidad en las operaciones agrícolas asistidas por maquinaria. *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, N° 1. Enero-Marzo, 2023. Pág. 163-177.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.6005>

- 1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: ngomez@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7961-7529>
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: fwatson@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8258-4668>
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
Correo electrónico: msolorzano@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-2137-0003>

Palabras clave

Maquinaria agrícola; coeficientes de uniformidad; labranza; sembradora; pulverizadora.

Resumen

La eficiencia de las labores agrícolas mecanizadas incide en el rendimiento general de los cultivos y en la uniformidad de la producción, variables determinantes en la definición adecuada de las zonas de manejo diferenciado. Las pruebas de uniformidad de los implementos repercuten en la toma de decisiones para adquirir implementos y la administración de ellos. El objetivo de este trabajo es promover el uso eficiente de la maquinaria agrícola en el campo y evaluar las operaciones agrícolas para el uso adecuado de los recursos de producción. Se determinaron coeficientes de uniformidad del trabajo realizado con cada uno de los implementos probados, además otras variables operativas que influyen en el desempeño de ellas. Las labores más uniformes son las realizadas con implementos de labranza vertical (CU > 80%), aunque se conoce que demandan mayor potencia para romper la estructura del suelo, la sembradora volumétrica es más uniforme a velocidades de avance bajas (CU = 86,73%) y la pulverizadora presentó aplicaciones más homogéneas a bajas presiones de operación (CU = 98%). Las mediciones de uniformidad y actividades de calibración de los implementos permitieron identificar puntos críticos en la maquinaria, y fundamentar la importancia de determinarlos para la mejora continua de las operaciones agrícolas tendientes a lograr rendimientos del cultivo homogéneos.

Keywords

Agricultural machinery; uniformity coefficients; tillage; seeder; sprayer.

Abstract

The efficiency of mechanized agricultural work affects the general yield of crops and the uniformity of production, determining variables in the adequate definition of differentiated management areas. Implement consistency tests impact implement purchasing and implement management decisions. The objective of this work is to promote the efficient use of agricultural machinery in the field and to evaluate agricultural operations for the proper use of production resources. Uniformity coefficients of the work carried out with each of the implements tested were determined, as well as other operative variables that influence their performance. The most uniform tasks are those carried out with vertical tillage implements (CU > 80%), although they demand more power to break the soil structure, the volumetric seeder is more uniform at low speeds (CU = 86.73%) and the sprayer presented more homogeneous applications at low operating pressures (CU = 98%). The uniformity measurements and calibration activities of the implements allowed identifying critical points in the machinery, and substantiating the importance of determining them for the continuous improvement of agricultural operations aimed at achieving homogeneous crop yields.

Introducción

La mecanización agrícola se considera la columna vertebral de la producción agrícola. La mayoría de operaciones agrícolas mecanizadas contribuyen directamente a la preparación del suelo, el establecimiento de un semillero adecuado, el mantenimiento y la cosecha del cultivo [1]. La eficiencia de las labores incide en el rendimiento general de los cultivos y en la uniformidad de la producción, variables determinantes en la definición adecuada de las zonas de manejo

diferenciado [2]. La eficiencia de la maquinaria utilizada en las labores debe ser evaluada en el campo, con el fin de detectar puntos críticos o mejoras inherentes a su capacidad de trabajo. La uniformidad de distribución de la semilla, pulverización y de la profundidad de labranza, se relacionan con la velocidad de avance de los equipos utilizados en las labores y las condiciones generales del terreno [3].

Las pruebas de uniformidad de los implementos repercuten en la toma de decisiones para adquirir implementos y la administración de ellos [4], [5]. La velocidad de trabajo es una variable que incide directamente en el rendimiento operativo y demanda energética para el funcionamiento de la maquinaria agrícola, e incluso en algunos implementos, su ancho de trabajo influye en la capacidad de trabajo debido a la demanda de potencia para romper el suelo [5] o la fuerza de tiro requerida cuando se opera a capacidad máxima (sembradoras y pulverizadoras), por lo que son parámetros a considerar cuando se mide la uniformidad del trabajo. En el caso de implementos de labranza primaria, las uniformidades de profundidad de labranza son menores a las teóricas debido a que el suelo presenta altas resistencias, situación en la que también influye el diseño de las herramientas [6] y las condiciones de resistencia de la rodadura de los tractores que tiran [7].

Determinar la uniformidad del trabajo, también facilita la investigación en la perturbación del terreno producto de la interacción entre el suelo y los implementos, y proporciona una base para mejorar el efecto de la labranza e incluso para determinar el distanciamiento entre las herramientas de trabajo de los aperos cuando se realiza la preparación del suelo [8]. En el caso de las pulverizadoras, la evaluación técnica de uniformidad de aplicación de las boquillas bajo factores climáticos y de operación específica para cada cultivo, permite obtener beneficios económicos y técnicos. Al mejorar la calidad del asperjado, se disminuye el número de aplicaciones y la incidencia de plagas y enfermedades [9]. Operativamente, medir la uniformidad de trabajo de los implementos también permite la intervención de las máquinas ante desperfectos que estén influyendo en la eficiencia de los trabajos, tales como desgastes de elementos y mecanismos que intervienen en la calibración adecuada de los aperos. En cuanto al uso correcto de los equipos, una nivelación incorrecta transmite esfuerzos innecesarios al tren trasero del tractor y en el caso de las sembradoras, no permite el trabajo correcto de carga de los dosificadores ocasionando una distribución de semilla no uniforme [10].

El coeficiente de uniformidad se basa en el coeficiente de variación estadística, considerando la dispersión de las medidas con respecto a la media de los datos utilizados [11], [12]. El presente trabajo fue realizado a partir de las mediciones y los resultados obtenidos de las prácticas del curso de Laboratorio de Tractores y Mecanización Agrícola de la Escuela de Ingeniería Agrícola. Esta nota técnica pretende ser un insumo didáctico para el grado de licenciatura de dicha carrera y de apoyo para profesionales de ingeniería agrícola a cargo de la toma de decisiones en las operaciones mecanizadas, automatizadas o digitalizadas de diferentes cultivos. El objetivo es promover la aplicación eficiente de la maquinaria agrícola en el campo y evaluar las operaciones agrícolas con miras a una mejora continua en el uso de los recursos de producción, por medio de la determinación de coeficientes de uniformidad de arados subsoladores, sembradoras volumétricas (de chorro) y pulverizadoras.

Metodología

Se determinaron los coeficientes de uniformidad de trabajo de los siguientes implementos; arado subsolador, arado excavador (palín), arado rotativo, sembradora volumétrica y pulverizadora integral. Las pruebas de uniformidad de profundidad de labranza del suelo (arado subsolador, arado excavador, arado rotativo) y pulverización se establecieron en el campo de prácticas de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, donde las

condiciones del suelo fueron las mismas para las labores de labranza, con una pendiente del 6%, suelo de textura Arcillosa y contenido de humedad de 34%, cercano al punto friable del terreno. Las pruebas de uniformidad en sembradora volumétrica se realizaron en una empresa productora de arroz colaboradora de la institución, ubicada en el Pacífico Central de Costa Rica. Las pruebas realizadas con la pulverizadora y la sembradora se hicieron en superficies planas, homogéneas y cementadas.

Resumen de las pruebas realizadas

Con el fin de evaluar la eficiencia de la maquinaria agrícola utilizada en las pruebas, se determinaron coeficientes de uniformidad del trabajo realizado con cada una, además de contemplar variables operativas que influyen en el desempeño de ellas. Se realizaron las siguientes actividades para la recolección de la información:

- Para las labores de labranza, con cada uno de los equipos se realizó dos pases de la maquinaria a una velocidad lenta y dos pases de maquinaria a una velocidad mayor. En el caso del arado rotativo, se incluyó levantar la tapa del implemento o dejarla cerrada, se midió la profundidad de trabajo de los implementos, las velocidades de avance y la resistencia al corte del suelo para relacionarla con la demanda de potencia necesaria para romper la estructura del terreno.
- Para la sembradora volumétrica, se realizó la prueba de descarga de semilla en cada chorro, pesando la semilla dispensada en cada salida mientras el implemento estaba estático y cuando avanzó a dos velocidades diferentes.
- Para la fumigadora, se colectó el volumen que asperja cada boquilla, cuando la maquinaria trabajó a velocidades de avance iguales en cuatro pruebas diferentes de presiones de operación de la bomba (30, 40, 60 y 100 kg/cm²).

En la figura 1, se muestra el terreno en el que se realizaron las prácticas de labranza de suelos, después de los pases de los implementos probados.



Figura 1. Establecimiento de los experimentos con pases de equipos de labranza a diferentes velocidades de avance

En el cuadro 1, se muestra un resumen y la descripción de los equipos utilizados en las pruebas realizadas.

Cuadro 1. Características de los equipos agrícolas utilizados en las pruebas.

Labor	Tractor utilizado	Implemento evaluado	Descripción del implemento
Labranza del suelo	Massey Ferguson 6066	Arado subsolador TATU AST	Implemento Integral de tres picos Capacidad de profundidad de trabajo: 0,75 - 1 m Ancho de trabajo: 1,45 m Sin topes ni aletas en las herramientas Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 15 km/h
	Massey Ferguson 6066	Arado excavador (palín) Selvatici Serie 150-75	Implemento Integral de 8 azadones Capacidad de profundidad de trabajo: 0,2 – 0,5 m Ancho de trabajo: 1,8 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: Debe ser utilizado a velocidad reducida (transmisión super reductora) no superior a los 6 km/h
	Massey Ferguson 60-66 DT	Arado rotativo Nardi	Implemento Integral de 6 cuchillas Capacidad de profundidad de trabajo: 0,2 – 0,45 m Ancho de trabajo: 1,1 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 15 km/h
Siembra de arroz	John Deere 7515	Sembradora volumétrica Baldán SPD4000	Implemento de tiro 20 chorros espaciados cada 0,17 m Barra de calibración: 10,5 cm Diámetro de llanta: 1,2 m Ancho de trabajo: 3,2 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 20 km/h
Fumigación	Massey Ferguson 6066	Pulverizadora Montana 400 TLP	Implemento integral 20 boquillas Magnum 11003-BD, espaciadas cada 0,5 m Velocidad máxima recomendada por el fabricante: 15 km/h

Coeficiente de uniformidad y velocidad de avance

El coeficiente de uniformidad para cada labor, se basa en el coeficiente de variación estadística, considerando la dispersión de las medidas obtenidas en las diferentes pruebas de los implementos con respecto a una media de los datos obtenidos para cada condición evaluada, la ecuación 1 lo describe:

$$\%CU = 100 * \left(1 - \frac{\sigma}{\bar{x}}\right) \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde, %CU es el porcentaje de uniformidad de la prueba realizada, σ es la desviación estándar de los datos y \bar{x} es la media de los datos.

La velocidad de avance de los equipos agrícolas, se determinó tomando el tiempo de desplazamiento en una distancia conocida en el sitio de las prácticas, para lo que se utilizaron estacas y cintas métricas de 50 m de largo. Se conoce aplicando la ecuación 2.

$$v = \frac{d}{t} * (3,6) \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde, v es la velocidad de avance (km/h), d es la distancia recorrida (m) y t es el tiempo del recorrido (s).

Determinación de los coeficientes de uniformidad

Determinación del coeficiente de uniformidad de la profundidad de labranza del suelo

Para la determinación de la uniformidad de la profundidad de la labranza, se realizó la calibración previa de cada uno de los implementos, así como la medición del ángulo de incidencia de las herramientas con respecto al nivel de referencia del suelo para asegurar que en todos los pases fuese el mismo. Utilizando dos velocidades diferentes dentro del rango de velocidad recomendado por el fabricante, se realizaron dos pases de cada tipo de arado: subsolador, excavador y rotativo. Para el arado rotativo además se midió una variable operativa adicional, con la tapa del implemento levantada y con la tapa del implemento cerrada, con el fin de probar las diferentes condiciones de operación que utilizan los productores. En distancias de 50 m de largo, se tomó el tiempo del recorrido, paralelamente a la medición del patinaje de los rodamientos delanteros y traseros del tractor. Aunque la resistencia a la rodadura no es analizada en este documento, es recomendable realizar la medición como insumo en las tomas de decisiones operativas de la maquinaria.

Una vez completados los pases, se utilizó un perfilómetro con 20 varillas de medición distanciadas 0,05 m cada una, con el fin de hacer 3 mediciones parciales del perfil del terreno labrado de un metro de largo de cada pase lineal de la maquinaria de forma aleatoria. Se coloca sobre el suelo en la línea de trabajo del implemento y se deja penetrar la varilla hasta el piso de la labranza, tomando la medida de la varilla que sobre sale del bastidor del perfilómetro (figuras 2 y 3).

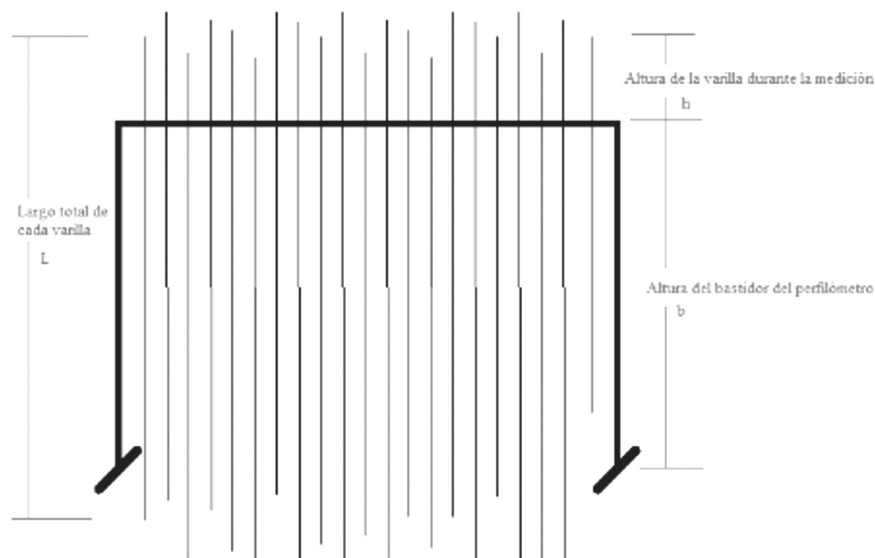


Figura 2. Detalle del perfilómetro.

La profundidad de labranza para cada implemento a cada velocidad, medida con el perfilómetro, permite obtener un perfil del suelo trabajado con su respectiva dispersión de los datos para calcular el coeficiente de uniformidad y graficar el perfil del suelo referenciado con la profundidad teórica de trabajo del implemento. La profundidad de labranza en cada varilla del perfilómetro, se obtiene de la ecuación 3.

$$\text{Profundidad de labranza} = L - (b + h) \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde L es la longitud de las varillas (todas son iguales), b es la altura del bastidor del perfilómetro y h es la altura sobresaliente de la varilla cuando se mide profundidad.

De la información obtenida para cada implemento de labranza de suelos, se tabula la velocidad de avance, el coeficiente de uniformidad y se grafica el perfil de profundidad de labrado.



Figura 3. Medición de la profundidad de labranza y velocidad de avance.

La eficiencia de labranza, se calculó a partir del porcentaje que representa la profundidad promedio lograda en el campo con relación a la profundidad teórica a la que trabaja cada implemento según el fabricante. Para obtenerla se utilizó la ecuación 4.

$$\text{Eficiencia de labranza (\%)} = 100 * \frac{\text{Profundidad de labranza promedio (cm)}}{\text{Profundidad de labranza teorica (cm)}} \quad \text{ecuación 4}$$

Otra medición realizada para evaluar la operación de labranza, fue la potencia requerida para romper el suelo a partir de la resistencia al corte (RC) del suelo (esfuerzo cortante). Inmediatamente después del trabajo de labranza, se midió RC con una veleta Eijkelkamp N°2, a 15 cm de profundidad en el perfil debido a que son implementos utilizados en horticultura, para determinar la potencia requerida en función del área de corte tangencial del implemento su profundidad teórica de trabajo (ecuación 5).

$$P = \frac{RC * A * PT * v}{1000} \quad \text{ecuación 5}$$

Donde P es la potencia requerida para romper el suelo después del pase del implemento (kW), RC es la resistencia al corte (Pa), A es el ancho de trabajo del implemento de labranza (m), PT es la profundidad de trabajo teórica del implemento (m) y v es la velocidad de avance del implemento durante la prueba (m/s).

Determinación del coeficiente de uniformidad de distribución de semilla de arroz con sembradora de chorro

Para la determinación de la uniformidad en la distribución de las semillas de arroz en la sembradora de chorro, primero se verificó que la barra de calibración estuviera en la misma posición y mantuviera las mismas condiciones de operación para todas las pruebas. Se realizó la prueba estática del implemento y luego se repitió a dos velocidades de avance diferente. Para cada prueba se colocó un recolector en cada chorro de la sembradora, con el fin de pesar la semilla dispensada en el trayecto de la longitud de la prueba en cada salida (figura 4). El pesado de la semilla se hizo en una balanza analítica graduada en gramos con precisión de $\pm 0,05$ g. La sembradora tiene dos compartimentos contenedores de semilla independientes, por lo que las mediciones se reflejan para ambos, tanto izquierdo como derecho.



Figura 4. Medición de la cantidad de semilla por cada chorro de la sembradora en estudio.

Los resultados obtenidos para cada una de las pruebas se presentan de forma gráfica, simulando una siembra con un viaje de ida y vuelta en un terreno de 100 metros de largo. A cada una de las pruebas simuladas se le calcula el %CU de la densidad de siembra y se compara con el %CU de dispensa de semilla de la sembradora.

Determinación del coeficiente de uniformidad de la aplicación con pulverizadora

Para la determinación de la uniformidad en el asperjado de la pulverizadora en estudio, primero se verificó que el implemento estuviese nivelado y que las tuberías y sujeciones estuviesen en buen estado. Se realizó la prueba con cuatro presiones de operación de la bomba del implemento, midiendo el tiempo de avance en longitudes de 50 m para cada prueba y colocando un recolector en cada boquilla de la fumigadora para cada prueba, con el fin de conocer el volumen de líquido dispensado en cada salida (figura 5), medido en una probeta de 1 L de capacidad con incertidumbre de ± 5 ml.



Figura 5. Recolección de volumen de cada boquilla de la pulverizadora en estudio.

Análisis de datos

Los datos obtenidos se promedian por cada implemento y velocidad o presión aplicada y se calculó la desviación estándar para obtener el coeficiente de uniformidad de cada labor. Los resultados serán comparados por medio de un análisis de varianzas para verificar si hay diferencias destacables para la formulación de las conclusiones y recomendaciones de la operación, utilizando RStudio 4.1.

Resultados y discusión

Labranza de suelos

En la figura 6 y el cuadro 2, se muestran los resultados de las mediciones inmediatamente después de aplicar los implementos en el suelo. La labor del subsolado obtuvo el único coeficiente de uniformidad aceptable de profundidad de labranza entre los implementos estudiados, a una velocidad de avance promedio de 15,84 km/h. Debido a que el terreno para todas las pruebas fue el mismo y se utilizó el mismo tractor, se considera que, si es posible lograr coeficientes de uniformidad altos variando la velocidad de avance de los equipos, y considerando el patinaje durante la operación. Para el palín, las profundidades fueron significativamente diferentes con un aumento del 17,23% de la uniformidad cuando se aumentó la velocidad de avance, dentro del rango permitido por el fabricante. Cuando la velocidad fue menor, no hubo diferencia con el arado rotador, independientemente del uso o no de la tapa de este implemento en ninguna de las velocidades de avance probadas. Los coeficientes de uniformidad mayores corresponden a implementos de labranza vertical primaria, sin embargo, son los implementos que, al no desestructurar el suelo, requieren de mayor potencia para los tratamientos de labranza secundaria.

En la figura 6, se observa gráficamente los límites de profundidad teórica de los implementos (línea roja punteada). Las mejores eficiencias de la labranza se alcanzaron con el arado rotativo, pues fueron las profundidades más cercanas a las profundidades teóricas de los implementos según los fabricantes. Las pruebas corresponden a las indicadas en el cuadro 2.

Cuadro 2. Profundidad de labranza promedio y desviación estándar, velocidad de avance y coeficiente de uniformidad para los implementos de labranza evaluados

Prueba	Implemento	Velocidad de avance (km/h)	Profundidad promedio de labranza (cm)*	Desviación estándar (cm)	% CU	% Eficiencia	Potencia (kW)
1	Subsolador	15,84	24,06 ^c	4,73	80,35	60,14	16,33
2	Subsolador	10,44	20,71 ^b	4,89	76,39	51,79	8,91
1	Palín	3,53	25,68 ^c	6,31	75,43	73,38	1,97
1	Rotador (sin tapa)	11,52	20,64 ^{ab}	5,43	73,66	82,55	3,84
2	Rotador (con tapa)	23,04	19,77 ^{ab}	6,75	65,84	79,09	5,16
3	Rotador (sin tapa)	19,08	17,32 ^a	6,10	64,76	69,27	6,12
4	Rotador (con tapa)	14,76	18,16 ^{ab}	6,53	64,02	72,64	1,95
2	Palín	2,38	19,14 ^{ab}	8,00	58,20	54,68	0,40

*Las letras iguales no representan diferencias significativas según Tukey $p < 0,05$

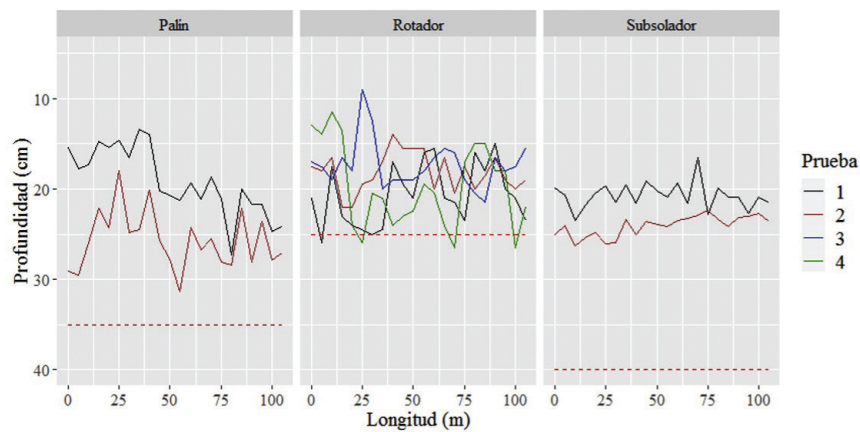


Figura 6. Perfiles de labranza obtenidos para cada velocidad de avance y profundidad teórica del implemento.

Siembra

En el cuadro 3 se muestran los resultados de las mediciones de salida de semillas en cada chorro de la sembradora en estudio en las tres condiciones de velocidad. La prueba estática es útil para verificar que el implemento esté trabajando en buena forma, pero es significativamente diferente a la salida de semilla en operación a diferentes velocidades de avance, por lo que se recomienda hacer las calibraciones de las sembradores en condiciones de operación similares al campo, tomando en cuenta que la velocidad mayor fue la menos uniforme, lo que puede reflejarse en un comportamiento no homogéneo del rendimiento debido a falta de uniformidad en la densidad de siembra.

Cuadro 3. Resumen de la cantidad de semilla dispensada por la sembradora de chorro.

Prueba	Velocidad de avance (km/h)	Promedio de Peso de semilla recolectada por chorro (g)*	Desviación del Peso (g)	Semilla total distribuida (kg/ha)	% CU	Marcha / rpm del tractor
1	NA	183,99 ^a	21,9	152,52	88,1	Estática
2	6,67	124,25 ^b	16,78	155,31	86,49	C1 @ 1800
3	12,53	128,71 ^b	37,21	154,7	71,09	C4 @ 2000

*Las letras iguales no representan diferencias significativas según Tukey $p < 0,05$

En la figura 7 se muestra la distribución de la salida de semilla por cada chorro de cada contenedor del implemento para las diferentes velocidades de las pruebas, diez salidas de cada lado. La importancia de esta medición radica en la detección de puntos críticos de la sembradora que pueden ser corregidos antes de la siembra en el campo que estén alterando la uniformidad de la distribución de la semilla, así como de acciones de mantenimiento correctivo que deben ser realizadas en elementos y mecanismos específicos del equipo. Por el ejemplo, deben ser revisadas las salidas 1 y 9 del contenedor izquierdo y las salidas 4 y 8 del contenedor derecho de la sembradora, según los picos observados en el gráfico para cada contenedor, además de verificar las salidas de mayor variación de cantidad de semilla con respecto a la media en las mediciones de la sembradora en el campo.

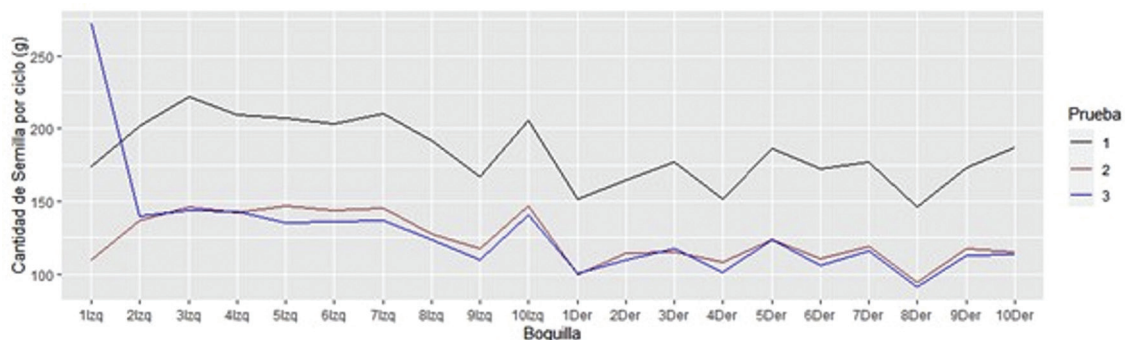


Figura 7. Cantidad de semilla para las salidas de cada contenedor de la sembradora en estudio

En caso de no realizarse correcciones sobre las salidas en donde se observen medidas anómalas, se generarán líneas de cultivo con diferentes densidades de siembra (figura 8). Esta variación en la densidad de cultivo entre líneas producirá que las aplicaciones de fertilizantes calculadas para valores teóricos sean ineficientes, lo cual, se reflejará en áreas con rendimientos productivos desuniformes.

En la figura 8 se realiza una visualización gráfica para cada una de las pruebas, en un escenario de ida y vuelta del equipo en una longitud de 100 m. En condiciones ideales, el coeficiente de uniformidad de la sembradora y el de la uniformidad de la densidad de siembra simulado, serán el mismo (Prueba1 = 88,41, Prueba2 = 86,73, Prueba3 = 71,91). Sin embargo, en condiciones reales existirán variables como patinaje y topografía o inclusive defectos de conformación del terreno que podrían hacer que el %CU de la densidad de siembra disminuya con respecto al %CU de la sembradora.

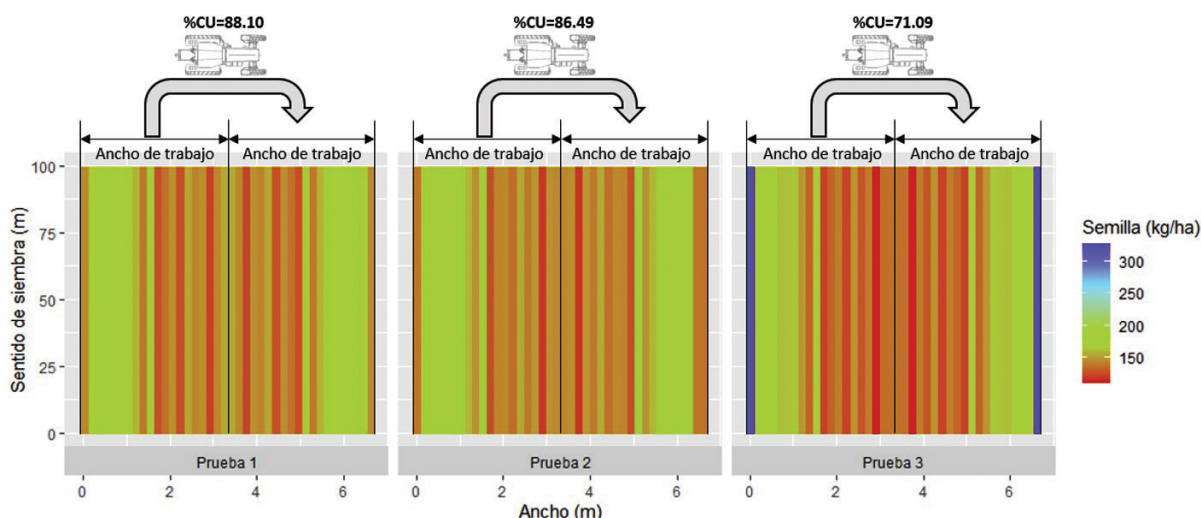


Figura 8: Visualización espacial de la distribución de semilla por hectárea en función del coeficiente de uniformidad de la sembradora.

Según Arias-Badilla et al. (2020), los agricultores en Costa Rica tradicionalmente han empleado densidades de siembra en arroz que están entre 350 y 400 kilogramos por hectárea (kg/ha); sin embargo, esta práctica generalmente propicia el desarrollo de plantas más delgadas y débiles. Las variedades Palmar 18, Lazzarroz FL y principalmente NayuribeB FL, a densidades entre 250 y 337 kilogramos por hectárea, propician una mejor respuesta a la fertilización. Según la referencia anterior, la calibración realizada al implemento estaría entregando menos semilla de lo recomendado.

Pulverización

En el cuadro 4 se muestran los resultados de las mediciones de las salidas de las boquillas de pulverizadora en estudio. Desde el inicio de las pruebas se descartó la medición de la boquilla en la posición 16 de izquierda a derecha del implemento, debido a que fugaba excesivamente el líquido, lo cual demuestra que hacer las pruebas brinda la ventaja de detectar posibles puntos críticos antes de la operación en el campo. Los mejores coeficientes de uniformidad se presentan a las menores presiones de operación de la bomba, por lo que para este caso se recomendaría hacer las dosificaciones que correspondan para los volúmenes de aplicación cuando el equipo opere a 30 o 40 kg/cm² para garantizar una aplicación homogénea al cultivo respectivo.

Cuadro 4. Resumen de las pruebas de la pulverizadora con diferentes presiones de operación.

Prueba	Promedio de volumen por salida (ml)	Desviación estándar del volumen por salida (ml)	% CU	Presión (kg/cm ²)	Velocidad (km/h)
Prueba 1	1216,84	62,48	94,87	100,00	1,20
Prueba 2	670,53	67,92	89,87	60,00	1,03
Prueba 3	539,84	9,03	98,33	40,00	1,00
Prueba 4	515,79	8,86	98,28	30,00	1,00

*Las letras iguales no representan diferencias significativas según Tukey p>0,05

En la figura 9 se muestra la distribución de las salidas de cada boquilla. Las boquillas numeradas a 1 a 10 corresponden al brazo de fumigación izquierdo, el cual debe ser revisado debido a la variabilidad cuando opera a 100 kg/m², además de sustituir la boquilla 16 que presentó desgaste excesivo de la cerámica de la salida (figura 10), al igual que las boquillas 8 y 19 que a las presiones mas altas presentan diferencias de volumen con respecto a las otras.

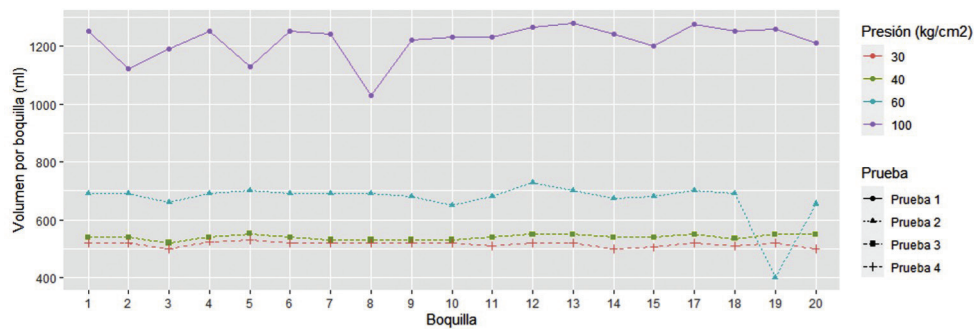


Figura 9. Volumen de salida de cada boquilla de la pulverizadora en estudio



Figura 10. Boquilla número 16 del equipo en estudio sustituida por desgaste excesivo

Conclusiones y recomendaciones

Para la labranza de suelos, los coeficientes de uniformidad mas altos los mostraron los implementos de labranza vertical, aunque el suelo después de preparado presentaría mayor demanda de potencia para trabajos posteriores a ellos. Además, en las condiciones de las pruebas, no alcanzan las profundidades de trabajo teóricas señaladas por el fabricante.

Para el arado rotador, no hay diferencias en cuanto a profundidad de labranza ni uniformidad cuando la tapa del implemento está cerrada o abierta. Este implemento es el que más se acerca a la profundiza en el perfil a la longitud que indica el fabricante, aunque con porcentajes de uniformidad bajos. El arado excavador presentó mejores uniformidades de profundidad de

labranza a velocidades de avance cercanas a las recomendadas por el fabricante. En todos los casos se recomienda en análisis de la resistencia a la rodadura, para mejorar el desempeño de la maquinaria mejorando el balanceo estático del tractor si fuese necesario.

La sembradora no tiene diferencias significativas de cantidad de semilla distribuida por cada chorro, sin embargo, a mayores velocidades disminuyó la uniformidad de las salidas de la semilla. Se recomienda verificar en el campo otras velocidades de avance que mantengan la uniformidad en la salida de las semillas en cada chorro y capacitar a quienes operen los equipos para que mantengan velocidades adecuadas para la labor.

Para la fumigadora, se determinó coeficientes de uniformidad aceptables para las presiones de operación mas bajas (30 y 40 kg/cm²), por lo que se recomienda calcular las dosificaciones con base en estas presiones de trabajo del sistema en estudio y verificar el estado general del equipo, especialmente en el brazo de fumigación izquierdo que presenta las mayores variaciones a presiones de 60 y 100 kg/cm².

Durante el proceso de determinación del coeficiente de uniformidad, es posible detectar puntos críticos específicos en la operación de los implementos en el campo, tales como desgastes de boquillas o salidas de semillas defectuosas, por lo que se recomiendan mediciones periódicas para garantizar homogeneidad del trabajo y ejecutar acciones preventivas que garanticen el buen funcionamiento de las máquinas. Las labores mecanizadas homogéneas permiten alcanzar rendimientos de producción mejores y establecer zonas de manejo diferenciado con mejor criterio cuando las máquinas no sean los factores de las variaciones en el campo.

Se recomienda considerar parámetros operativos como la resistencia a la rodadura y características físicas del suelo sobre el que trabajan los implementos evaluados para posibilitar la mejora continua de las operaciones agrícola mecanizadas. Altos coeficientes de uniformidad permiten obtener cosechas homogéneas, y la evaluación de las operaciones apoyadas con maquinaria facilitan el uso eficiente de los recursos de producción.

Las labores estudiadas, corresponden a operaciones comunes antes de la cosecha de los cultivos, sea preparación de suelos, siembra y mantenimiento de la plantación, por lo que el efecto acumulativo de los coeficientes de uniformidad se reflejará en el rendimiento de la producción. Los porcentajes de los CU de las diferentes prácticas, repercuten sobre la uniformidad del rendimiento del cultivo.

Agradecimientos:

A la Vicerrectoría de Docencia del TEC por facilitar los medios para hacer las mediciones dentro del curso “Laboratorio de Tractores” del segundo semestre del año 2021, a los estudiantes que realizaron las mediciones y procesaron los datos y al Sr. Guillermo Navarro, asistente académico del curso.

Referencias

- [1] J. Hikmat Namiq Al-Talabani and M. Ahmed Jalal Al-Sammaraie, “THE EFFECT OF PLOWING AND PULVERIZATION SYSTEMS ON SOME PLANT INDICATORS OF ONION,” *PLANT Arch.*, vol. 21, no. Suppliment-1, pp. 851–853, Jan. 2021, doi: 10.51470/PLANTARCHIVES.2021.v21.S1.129.
- [2] E. M. Albornoz, A. C. Kemerer, R. Galarza, N. Mastaglia, R. Melchiori, and C. E. Martínez, “Development and evaluation of an automatic software for management zone delineation,” *Precis. Agric.*, vol. 19, no. 3, pp. 463–476, 2018, doi: 10.1007/s11119-017-9530-9.
- [3] E. Soza, E. Pezzoni, G. Botta, M. Tourn, and D. Agnes, “Eficiencia de implantación de trigo con labranza en franjas a distintas velocidades de avance,” *Rev. la Fac. Agron.*, vol. 25, no. 2, pp. 121–127, 2005.

- [4] A. Rodríguez *et al.*, "Implications of crop model ensemble size and composition for estimates of adaptation effects and agreement of recommendations," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 264, pp. 351–362, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.agrformet.2018.09.018.
- [5] E. S. Osuna-Ceja, F. Garibaldi Márquez, and R. V. García Hernández, "Desempeño de un subsolador integral biomimético para laboreo sustentable de suelos agrícolas," *Acta Univ.*, vol. 29, pp. 1–14, 2019, doi: 10.15174/au.2019.1968.
- [6] N. Rangeon, L. Aciar, R. Osinaga, J. Arzeno, and C. Sánchez, "Análisis de la resistencia a la penetración y humedad de suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranza," *XXI Congr. Argentino la Cienc. del suelo. Semiáridoun desafío para la Cienc. del Suelo*, 2008.
- [7] Arrazate-Oropeza, Gómez-Calderón, and Villagra-Mendoza, "Comparación de patinaje bajo diferentes tipos de labranza de suelo," in *XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola*, 2016, p. 649.
- [8] Hang, Huang, and Zhu, "Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method," *J. Terramechanics*, vol. 74, pp. 35–43, 2017, doi: 10.1016/j.jterra.2017.10.002.
- [9] G. Bernal, M. Posada, and V. Piedrahíta, "Evaluación Técnica de Tres Tipos de Micronairs que se Utilizan en la Fumigación Aérea del Banano.," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, vol. 51, no. 1, pp. 237–252, 1998.
- [10] F. Manqui, J. Riquelme, and A. Villablanca, "Sembradoras de granos," *NFORMATIVO INIA N°69*, 2012. [Online]. Available: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/4699/NR40613.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accessed: 15-Nov-2021].
- [11] M. Villón, *Hidrología estadística*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2006.
- [12] G. V. Cormack and M. R. Grossman, "Quantifying bias and variance of system rankings," *SIGIR 2019 - Proc. 42nd Int. ACM SIGIR Conf. Res. Dev. Inf. Retr.*, pp. 1089–1092, 2019, doi: 10.1145/3331184.3331356.
- [13] J. G. Arias-Badilla, E. A. Esquivel-Segura, and R. Campos-Rodríguez, "Evaluación de la densidad de siembra y nivel de fertilización en arroz, para las variedades Palmar-18, Lazarroz FL y NayuribeB FL, en Parrita (Pacífico Central), Costa Rica," *Rev. Technol. en Marcha*, Jul. 2020, doi: 10.18845/tm.v33i3.4363.