UJAT
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
"Estudio en la duda. Acción en la fe"

JEEOS

Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability

2026



Vol. 10 Núm. 3 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2026-050410175100-102. ISSN: 2448-8186

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.http://www.1atindex.unam.mx/ JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 3, Año 2026, es una publicación continúa editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2026-050410175100-102, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 15 de diciembre 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Índice Vol. 10 Núm. 3 (2026)

Transformación material en la vivienda chontal, caso de estudio: Huimango, Cunduacán, Tabasco 1-12
Campos-de Dios P.C.[1*], Govea-Ek A.[1]

Inhibición de corrosión en acero API 5L-X52 mediante extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw* 13-25
Estrada-Hernández G. V., Figueroa-Ramírez S.J.[*], Sierra-Grajeda J.M.T., Santis Espinosa L.F., Benavides O., De la Cruz-May L.

Efecto de las nanoparticulas metálicas sobre el crecimiento de la microalga *Coelastrella sp*. para la producción de biocombustible 26-37
Santis-Espinosa L.F[1*], Figueroa-Ramírez S.J.[1], Vargas-Estrada L.[2], López-Vidaña E.C.[3]

Influence of dopant material on a silicone polymer subjected to low-pressure air plasma treatments 38-52
Alarcón-Hernández F.B.[1]*, Fuentes-Albarrán M. del C.[1], Paredes-Olguín M.[2], Avelar-Domínguez F.[1], Gadea-Pacheco J.L.[1], Sandoval-González A.[3]

Cambio en la producción de potencia empleando Na_2SO_4 en el cátodo de una celda de combustible microbiana 53-60
Fuentes-Albarrán M. del C.[1]*, Alarcón-Hernández F.B.[1], Cornejo-Tapia C.P.[1], Sandoval-González A.[2]

Estudio exploratorio del contenido de etanol en la pulpa de la T*hevetia peruviana* (Pers.) K. Schum en Yucatán, México 61-79
Koh-Echeverría L.E.[1], Amado-Méndez K.[2], Díaz-Ballote, L.F.J.[2], Herrera-Zamora, D.M.[2]*

Determinación de carbohidratos por HPLC: comparación de detectores UV-Vis *vs* índice de refracción 80-93
Fernández-Orozco I.V.[1], Grijalva-Haro M.I.[2], Madrigal-Diaz S.C.[1], Ojeda-Morales M.E.[1], Díaz-Reyes C.C.[1], García-López S.[1], Juárez-Zirate S.J.[3]*

Efecto de un plasma pulsado de aire en las propiedades superficiales de caucho butílico 94-103
Alarcón-Hernández F.B.[1]*, Fuentes-Albarrán M. del C.[1], Garay-Galicia J.A.[1], Sandoval-Gonzáles A.[2]

Estudio del tiempo de fraguado en pastas de cemento con sustitución parcial por biocemento de ostión 104-116
Segundo-Díaz T. de J.[1], Mora-Ortiz R.S.[1]*, Díaz-Alvarado S.A.[1], Ramón-de los Santos C. [2]

Estudio teórico de un captador solar de aire con y sin material de cambio de fase 117-128
Álvarez-Alor B.[1*], Cruz-Valdez J. A. [2], Montalvo D. [3], López-Santos F.[1], Alvarado-Méndez P. E.[4], Zetina-Ríos I. I.[5].

Transformación material en la vivienda chontal, caso de estudio: Huimango, Cunduacán, Tabasco

Material transformation in the chontal housing case study: Huimango, Cunduacán, Tabasco

Campos-de Dios P.C.[1*], Govea-Ek A.[1]

[1] División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1. Cunduacán, Tabasco, México.
*paocamposdd@hotmail.com

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

RESUMEN

La arquitectura vernácula chontal se encuentra en un proceso de transformación material a consecuencia de la industrialización. Esta situación motivó el presente estudio, el cual se derivó de una tesis de maestría que tomó como caso de estudio el poblado Huimango, en Cunduacán, Tabasco, donde aún persisten viviendas indígenas y criollas que permitieron observar dichas transformaciones. El estudio se enfocó en el análisis de los materiales empleados en la estructura, cubierta y muros de trece viviendas vernáculas, con el fin de identificar indicios de cambio. Para lograr lo anterior, se aplicó una lista de cotejo y un registro fotográfico que permitieron documentar los materiales presentes. Posteriormente, estos se clasificaron según su origen (naturales, artesanales o industrializados) y se evaluaron sus frecuencias de uso. En los resultados se mostró una permanencia de materiales naturales en la vivienda indígena, mientras que la criolla evidenció una sustitución creciente de los materiales tradicionales por industrializados, especialmente en las cubiertas y muros. El análisis confirmó que la vivienda chontal en Huimango se encuentra en un proceso de transformación donde la tradición aún resiste, aunque ya se observan señales que anticipan un debilitamiento de su identidad constructiva. En estos hallazgos se subraya la importancia de preservar los materiales tradicionales, pues contienen conocimientos locales que mantienen un equilibrio entre la vivienda y el entorno.

Palabras clave: Arquitectura vernácula, industrialización, materialidad

ABSTRACT

Chontal vernacular architecture is undergoing a process of material transformation as a consequence of industrialization. This situation motivated the present study, which was derived from a master's thesis that took the town of Huimango, in Cunduacán, Tabasco, as its case study, where indigenous and Creole dwellings still persist and made it possible to observe these transformations. The study focused on analyzing the materials used in the structure, roofing, and walls of thirteen vernacular dwellings in order to identify indications of change. To achieve this, a checklist and a photographic record were applied to document the materials present. Subsequently,

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

these materials were classified according to their origin (natural, artisanal, or industrialized), and their frequencies of use were evaluated. The results showed a persistence of natural materials in indigenous housing, while Creole housing revealed a growing replacement of traditional materials with industrialized ones, especially in roofs and walls. The analysis confirmed that Chontal housing in Huimango is undergoing a process of transformation in which tradition still persists, although signs can already be observed that anticipate a weakening of its constructive identity. These findings highlight the importance of preserving traditional materials, as they contain local knowledge that maintains a balance between housing and its surrounding environment.
Keywords: Vernacular architecture, industrialization, materiality

INTRODUCCIÓN

Hablar de la arquitectura vernácula tabasqueña implica reconocer en su materialidad la memoria de un pueblo que aprendió a construir en diálogo con su entorno. En este territorio, donde la humedad, las lluvias y el calor marcan el ritmo de la vida, se identifican dos tipologías originarias de vivienda vernácula según Carrillo Salazar y González Lobo [1]: la indígena y la criolla.

La vivienda indígena representa la continuidad de saberes ancestrales chontales transmitidos de generación en generación, los cuales se reflejan en el uso de materiales naturales como el guano, el jahuacte o distintas maderas autóctonas [2] (**Figura 1**). En estas construcciones se demuestra que no se busca la imposición al medio, sino su comprensión, la utilización de sus recursos y su transformación en refugio.



Figura 1. Uso de materiales naturales en la vivienda indígena tabasqueña

En la vivienda criolla, en cambio, se presenta una dualidad de influencias. Por un lado, se muestra una influencia española producto de la colonización [3], la cual es visible en el empleo de materiales artesanales como las tejas de barro, celosías y mosaicos de pasta [4] (**Figura 2**). Por otro lado, se incorporan saberes ligados a los maya-chontales al retomar dos materiales emblemáticos de la zona arqueológica de Comalcalco, Tabasco: el ladrillo de barro y el triturado de ostión en el mortero [5]. Mientras que el primero es un material característico en esta tipología [4], el segundo,

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

a decir de los pobladores, se empleaba en las viviendas más antiguas localizadas en comunidades aledañas a dicho sitio arqueológico. De esta manera, la vivienda criolla se consolidó como un símbolo de identidad que utiliza la herencia local y europea para proyectar distinción y posición social.



Figura 2. Uso de materiales artesanales en la vivienda criolla tabasqueña

Ambas tipologías coexistieron durante décadas, dotando de identidad a los pueblos y reflejando una relación entre el habitante, la vivienda y su entorno. Sin embargo, esa conexión comenzó a debilitarse cuando Tabasco entró en una etapa de transformación impulsada por el descubrimiento del petróleo y el auge económico que este generó en la década de 1980 [6], lo que marcó un punto de quiebre en la historia constructiva de la región. A partir de entonces, materiales industrializados como el block o la lámina galvanizada comenzaron a sustituir a los tradicionales [7].

Los motivos de sustitución abarcaron desde la búsqueda de mayor durabilidad y facilidad de obtención [8], hasta la influencia de factores simbólicos. Los nuevos materiales comenzaron a representar ideales de progreso y modernidad, mientras que los tradicionales empezaron a percibirse como un signo de atraso [7]. De esta manera, las viviendas vernáculas tabasqueñas fueron transformándose paulatinamente, perdiendo su carácter original ligado a la adaptación.

Frente a este panorama, aún es posible encontrar comunidades tabasqueñas donde la materialidad vernácula sigue presente, aunque sometida a procesos de transformación. El poblado chontal de Huimango, en el municipio de Cunduacán, Tabasco, representa un caso significativo para comprender dicho fenómeno. En esta comunidad persisten viviendas que pese a haber incorporado materiales industrializados, conservan elementos que reflejan la materialidad original y su vínculo con el entorno.

El presente artículo derivó de la tesis de maestría *Transformaciones en la vivienda chontal. Caso de estudio Huimango, Cunduacán, Tabasco*, que analizó los cambios y permanencias observados en las viviendas vernáculas del poblado. El estudio abordó tres categorías: los aspectos constructivos, que incluyen los materiales y las técnicas constructivas empleadas; los aspectos

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

formales, que abarcan sus dimensiones, colores y soluciones en planta y fachada; y los aspectos intangibles, como el uso de los espacios. No obstante, este artículo se delimitó a la transformación material, enfocándose en la estructura, cubierta y muros. Para ello, se describió la frecuencia de uso y distribución de los materiales naturales, artesanales e industrializados en las viviendas indígenas y criollas, con el fin de identificar indicios de transformación.

ZONA DE ESTUDIO

El poblado Huimango se encuentra a 8.9 km de la cabecera municipal de Cunduacán, en la región Chontalpa de Tabasco, México (**Figura 3**), y cuenta con 4,574 habitantes [9]. El asentamiento se distribuye en tres secciones, las cuales se consideraron en este estudio con el propósito de abarcar la diversidad de viviendas vernáculas presentes en la zona.

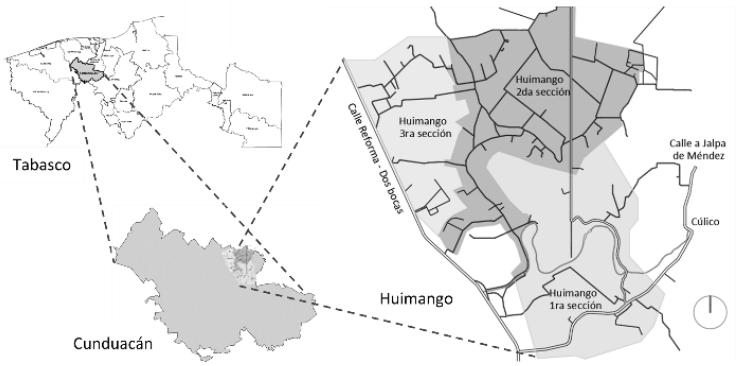


Figura 3. Macro Localización Del Municipio De Cunduacán En Tabasco Y Micro Localización De Huimango Dentro De Cunduacán

El territorio se caracteriza por su relieve plano, con una altitud de 15 metros sobre el nivel del mar. En la zona se presentan corrientes de agua intermitentes como el Muste y el Lechugal, así como corrientes perennes, entre ellas el Nacajuca [10].

Su clima es cálido y húmedo con lluvias abundantes durante el verano. La temperatura media anual es de 26.2°C, alcanzando un máximo promedio de 30.5°C en mayo y un mínimo de 22.5°C en diciembre y enero. Las precipitaciones anuales suman aproximadamente 1,947 mm, con un promedio máximo mensual de 327 mm en septiembre y un mínimo de 6 mm en abril [11].

METODOLOGÍA

En este trabajo se siguió un enfoque cualitativo de carácter descriptivo y tuvo como objetivo analizar los materiales empleados en la estructura, cubierta y muros de las viviendas vernáculas del poblado Huimango, en Cunduacán, Tabasco, a fin de identificar los procesos de transformación material experimentados.

La muestra se definió mediante un muestreo intencional que permitió seleccionar trece viviendas vernáculas en Huimango, de las cuales dos corresponden a la tipología indígena, ya que son las

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

únicas que se preservan en el poblado, y once de ellas son criollas, seleccionadas por ser representativas y por reflejar la diversidad formal y material de este tipo de vivienda. La elección de estas tipologías se basó en la clasificación de la arquitectura vernácula tabasqueña propuesta por Carrillo Salazar y González Lobo [1], quienes reconocen a las viviendas indígenas y criollas como las originarias del territorio tabasqueño. Además, se consideró que las viviendas seleccionadas cumplieran con los aspectos formales y materiales establecidos por dichos autores, así como la accesibilidad a las mismas para su estudio.

Para la recolección de datos se emplearon dos instrumentos. El primero fue una lista de cotejo diseñada para registrar de manera sistemática los materiales utilizados en cada componente de la vivienda, y el segundo fue un registro fotográfico destinado a la documentación visual de los mismos.

El análisis de la información se llevó a cabo de forma descriptiva y comparativa. En primer lugar, se elaboró un listado general de los materiales empleados en las viviendas analizadas, clasificándolos según su origen, ya sea natural, artesanal o industrializado. Posteriormente, se analizó la frecuencia de uso y la distribución de cada material en las distintas partes de las viviendas, como lo son la estructura, cubierta y muros. Los valores se definieron considerando que los materiales presentes en más del 70 % de las viviendas tienen una frecuencia de uso alta; aquellos que aparecen entre el 30 % y el 69 % reflejan una frecuencia media, mientras que los que se encuentran por debajo del 30 % corresponden a una frecuencia baja (**Tabla 1**). Finalmente, este análisis permitió identificar las tipologías de vivienda en las que los materiales industrializados tienen presencia, lo que permitió que se reconocieran indicios de transformación.

Tabla 1. Criterios para determinar la frecuencia de uso de los materiales en las viviendas vernáculas de Huimango

Frecuencia de uso	Número de viviendas donde se usa el material	Porcentaje de uso
Alta	De 9 a 13	≥ 70 %
Media	De 4 a 8	30 % – 69 %
Baja	De 1 a 3	< 30 %

RESULTADOS

En las viviendas vernáculas de Huimango se registró el uso de diecinueve materiales distintos, los cuales fueron agrupados de acuerdo a su origen (**Tabla 2**). Diez de ellos correspondieron a materiales naturales, cuatro a materiales de producción artesanal y cinco a materiales industrializados.

Transformación material en las estructuras. En la estructura de la vivienda indígena no se observaron transformaciones, debido al uso exclusivo de materiales naturales (**Tabla 3**). Los

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

materiales con mayor frecuencia de uso fueron el tatuán (*Colubrina arborescens*) y el chipilín (*Diphysa americana*), ya que se emplearon en el 100% de los casos, mientras que el cedro (*Cedrela odorata L.*) y el bambú (*Bambusa vulgaris*) presentaron una frecuencia media, al haberse utilizado en el 50% de las viviendas.

Tabla 2. Clasificación De Los Materiales En La Vivienda Vernácula De Huimango Según Su Origen

Material natural	Tatuán (*Colubrina arborescens*)
	Cedro (*Cedrela odorata L.*)
	Caoba (*Swietenia macrophylla King*)
	Bambú (*Bambusa vulgaris / Bambusa Oldhamii*)
	Chipilín (*Diphysa americana*)
	Guano largo (*Attalea butyracea*)
	Palma real (*Roystonea regia*)
	Coco (*Cocos nucifera L.*)
	Samán (*Samanea saman*)
Material artesanal	Ladrillo rojo
	Teja de barro criolla
	Teja de barro poblana
	Celosía artesanal
Material industrializado	Block
	Perfiles de acero
	Lámina galvanizada
	Lámina de asbesto
	Concreto

Tabla 3. Materiales empleados en las estructuras de la vivienda indígena

Tipología de vivienda		Indígena		
Total de viviendas analizadas		2		
		Número de viviendas donde se usa el	Porcentaje de uso en la tipología	Frecuencia de uso
Material natural	Tatuán	2	100%	Alta
	Cedro	1	50%	Media
	Bambú	1	50%	Media
	Chipilín	2	100%	Alta

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

En el caso de la vivienda criolla, en su estructura coexistieron materiales naturales, artesanales e industrializados, lo que reflejó procesos de transformación (**Tabla 4**). En cuanto a los naturales, persistió el dominio de maderas autóctonas como el tatuán y el cedro con una frecuencia de uso alta, ya que fueron utilizados en el 100% de la muestra. Por su parte, la madera de chipilín mantuvo una presencia media, al usarse en el 36.36% de los casos. Finalmente, en cuanto a la caoba (*Swietenia macrophylla King*) se observó una presencia baja, al emplearse en el 18.18% de los casos. Respecto a los materiales artesanales, en esta tipología de vivienda solo se empleó el ladrillo de barro, el cual tuvo una frecuencia de uso alta, pues se utilizó en el 100% de los inmuebles. En relación con los materiales industrializados, se observaron perfiles de acero en el 9.09% de las viviendas, lo que representó una frecuencia de uso baja que alteró la materialidad tradicional característica de esta tipología. Asimismo, en el 45.45% de las viviendas se implementó el uso de concreto, lo que simbolizó una frecuencia de uso media e indicó una tendencia hacia la sustitución del sistema constructivo tradicional.

Tabla 4. Materiales empleados en las estructuras de la vivienda criolla

Tipología de vivienda		Criolla		
Total de viviendas analizadas		11		
		Número de viviendas donde se usa el	Porcentaje de uso en la tipología	Frecuencia de uso
Material natural	Tatuán	11	100%	Alta
	Cedro	11	100%	Alta
	Caoba	2	18.18%	Baja
	Chipilín	4	36.36%	Media
Material artesanal	Ladrillo de barro	11	100%	Alta
Material industrial	Concreto	5	45.45%	Media
	Perfil de acero	1	9.09%	Baja

Transformación material en las cubiertas. En las cubiertas de la vivienda indígena se identificaron materiales naturales e industrializados (**Tabla 5**). Dentro de los materiales naturales, el guano largo (*Attalea butyracea*) fue el más representativo, ya que apareció en el 100% de los casos y presentó una frecuencia de uso alta. En cuanto a los materiales industrializados, el empleo de lámina galvanizada en el caballete se volvió común y mostró una frecuencia de uso alta al registrarse en el total de las viviendas analizadas. Su presencia introdujo un cambio en la materialidad tradicional que caracteriza a este tipo de vivienda.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

Tabla 5. Materiales empleados en las cubiertas de la vivienda indígena

Tipología de vivienda		Indígena		
Total de viviendas analizadas		2		
		Número de viviendas donde se usa el material	Porcentaje de uso en la tipología	Frecuencia de uso
Material Natural	Guano largo	2	100%	Alta
Material Industrial	Lámina galvanizada	2	100%	Alta

En las cubiertas de la vivienda criolla coexistieron materiales naturales, artesanales e industrializados (**Tabla 6**). Los materiales naturales se emplearon únicamente en las cubiertas de los anexos, los cuales corresponden a las cocinas de humo. En estos espacios se utiliza guano largo, aunque su frecuencia de uso es baja, ya que no todas las viviendas criollas conservan estas cocinas. Su presencia se observó en el 18.18% de la muestra. Respecto a los materiales artesanales, las tejas de barro criollas fueron identificadas como las más representativas de la tipología; sin embargo, debido a los procesos de transformación, su empleo disminuyó y presentaron una frecuencia de uso media, al registrarse en el 54.54% de las viviendas. Las tejas de barro poblanas también forman parte de esta materialidad, aunque su presencia es baja y solo se observó en el 18.18% de los casos analizados. En relación con los materiales industrializados, estos ganaron popularidad y empezaron a desplazar a los artesanales. Los más comunes fueron las láminas galvanizadas y las láminas de asbesto, ambas con una frecuencia de uso alta al utilizarse en el 81.81% de las viviendas. En algunos casos se observó el uso de concreto, aunque su empleo se limitó a los anexos. Dicho material presentó una frecuencia de uso baja y estuvo presente en el 9.09% de los casos.

Transformación material en los muros. En los muros de la vivienda indígena se identificaron únicamente materiales naturales (**Tabla 7**). El bambú (*Bambusa oldhamii*) fue el más representativo, con una frecuencia de uso alta al registrarse en el 100% de los casos. El cedro, el coco (*Cocos nucifera L.*), el samán (*Samanea saman (Jacq.) Merr.*) y la palma real (R*oystonea regia (HBK) O. F. Cook*) aparecieron con una frecuencia de uso media, cada uno presente en el 50% de las viviendas analizadas.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

Tabla 6. Materiales empleados en las cubiertas de la vivienda criolla

Tipología de vivienda		Criolla		
Total de viviendas analizadas		11		
		Número de viviendas donde se usa el material	Porcentaje de uso en la tipología	Frecuencia de uso
Material natural	Guano largo	2	18.18%	Baja
Material artesanal	Teja de barro criolla	6	54.54%	Media
	Teja de barro poblana	2	18.18%	Baja
Material industrial	Lámina galvanizada	9	81.81%	Alta
	Lámina de asbesto	9	81.81%	Alta
	Concreto	1	9.09%	Baja

Tabla 7. Materiales empleados en los muros de la vivienda indígena

Tipología de vivienda		Indígena		
Total de viviendas analizadas		2		
		Número de viviendas donde se usa el material	Porcentaje de uso en la tipología	Frecuencia de uso
Material natural	Cedro	1	50%	Media
	Bambú	2	100%	Alta
	Coco	1	50%	Media
	Samán	1	50%	Media
	Palma real	1	50%	Media

En los muros de la vivienda criolla coexistieron materiales naturales, artesanales e industrializados, lo que evidenció procesos de transformación (**Tabla 8**). Entre los materiales naturales, el cedro presentó una frecuencia de uso media, ya que apareció en el 45.45% de los casos, mientras que el bambú (*Bambusa oldhamii*) registró una frecuencia baja al observarse en el 18.18% de la muestra. El uso de estos materiales se limitó nuevamente a las cocinas de humo. Respecto a los materiales

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

artesanales, el ladrillo de barro fue el más representativo, con una frecuencia de uso alta al registrarse en el 100% de las viviendas. Las celosías artesanales también fueron características y presentaron una frecuencia de uso media, pues se observaron en el 63.63% de los casos. En relación con los materiales industrializados, el block adquirió presencia dentro de esta tipología. Este material presentó una frecuencia de uso media y apareció en el 63.63% de las viviendas analizadas, lo cual evidenció una tendencia hacia la sustitución de los sistemas constructivos tradicionales.

Tabla 8. Materiales empleados en los muros de la vivienda criolla

Tipología de vivienda		Criolla		
Total de viviendas analizadas		11		
		Número de viviendas donde se usa el material	Porcentaje de uso en la tipología	Frecuencia de uso
Material natural	Cedro	5	45.45%	Media
	Bambú	2	18.18%	Baja
Material artesanal	Ladrillo de barro	11	100%	Alta
	Celosía artesanal	7	63.63%	Media
Material industrial	Block	7	63.63%	Media

DISCUSIÓN

Los resultados demostraron que las transformaciones materiales más notables se localizaron en las cubiertas, donde los componentes industrializados desplazaron significativamente a los tradicionales. En la vivienda indígena este cambio fue observado en el empleo de láminas galvanizadas en el caballete, lo que representó una alteración puntual que no logró desplazar al guano largo. Por el contrario, en la vivienda criolla la transformación fue más evidente, debido a que las láminas galvanizadas y de asbesto sustituyeron en gran medida a las tejas de barro. Este fenómeno indicó una preferencia por materiales considerados por los pobladores como “más modernos” y resistentes en las cubiertas de las viviendas.

En cuanto a los muros, se hizo evidente una tendencia hacia la estandarización constructiva. En la vivienda criolla, el uso del block adquirió una presencia cada vez mayor, lo que sugirió que los sistemas tradicionales fueron perdiendo popularidad frente a materiales comerciales con mayor disponibilidad. En contraste, en los muros de la vivienda indígena se mostró una mayor conservación de la identidad original, manteniendo el uso predominante del bambú y diversas especies de madera local.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

Finalmente, las estructuras representaron el elemento donde se conservó de mejor manera la tradición constructiva, especialmente en la vivienda indígena, donde prevaleció el uso exclusivo de maderas autóctonas como el tatuán y el chipilín. En la vivienda criolla, aunque todavía predominó el empleo de maderas locales, se observó una transición mediante la incorporación gradual de concreto y acero. A diferencia de lo que ocurrió en las cubiertas y muros, la estructura de la vivienda criolla fue el componente donde materiales tradicionales e industrializados coexistieron de manera más equilibrada, conservándose gran parte de su esencia original.

La tendencia de sustitución material descrita guardó similitud con los hallazgos de Andrade Narváez [4], quien tomó como caso de estudio las viviendas vernáculas en la región de los Ríos, en Tabasco. En dicha investigación se determinó que las cubiertas son el primer elemento en transformarse ante la introducción de componentes industrializados, seguidas por los muros y, finalmente, por las estructuras. Este orden de sustitución fue considerado por el autor como un proceso de transformación lento que ocurre por etapas. Dicha jerarquía coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde la estructura se identificó como el componente más resiliente al cambio.

De igual manera, lo observado en esta investigación se alineó con lo expuesto por Torres Ledesma [7], quien en un estudio sobre la vivienda vernácula en Nacajuca, Tabasco, identificó que las modificaciones materiales se concentraron mayoritariamente en cubiertas y muros, lo cual generó alteraciones que modificaron los parámetros de confort térmico y afectaron directamente la calidad de vida de los habitantes, lo que permite comprender la relevancia que adquieren las transformaciones materiales en la dinámica actual de la vivienda vernácula.

CONCLUSIONES

El estudio realizado en Huimango evidenció que los procesos de transformación material en la arquitectura vernácula no son homogéneos. Mientras la vivienda indígena mostró permanencias al mantener casi intacto el uso de materiales naturales; la vivienda criolla, al estar conformada por una dualidad de influencias, se mantuvo más susceptible a la incorporación de un nuevo referente, en este caso, ligado a los ideales de modernización, los cuales se reflejan en la incorporación de materiales industrializados en las cubiertas y muros.

Los resultados revelaron que Huimango es una comunidad en transición, donde la industrialización no ha reemplazado por completo a la tradición, pero ya se empiezan a mostrar señales que anticipan una futura ruptura que pondría en riesgo la sostenibilidad y la identidad de estas construcciones.

Por último, los materiales tradicionales además de ser recursos para construir reflejan el conocimiento que los habitantes han desarrollado a partir de su relación con el territorio tabasqueño. Su preservación, por tanto, no responde a una mirada nostálgica, más bien se vincula con la necesidad de conservar y aprender sobre el equilibrio que estas viviendas presentan entre el habitar humano y el entorno.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

REFERENCIAS

[1] S. Carrillo Salazar y C. González Lobo "La vivienda rural en Tabasco". La vivienda rural en el sureste de México: Seis estudios sobre la vivienda rural en la región sureste de México, 61-62. Comisión Nacional de los Estados Unidos Mexicanos para la UNESCO, IV Comité Regional; Gobierno del Estado de Tabasco, Secretaría de Educación, Cultura y Recreación. Villahermosa, Tabasco, México.1988

[2] Instituto Nacional de Antropología e Historia Tabasco (2021). "La antigua vivienda chontal". INAH Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. [En línea]. Disponible: https://www.facebook.com/100044814540251/posts/la-antigua-vivienda-chontalcon-la-llegada-del-siglo-xxi-y-luego-de-ser-utilizada/885187795741403/?locale=es_LA [Consultado: 27-nov-2025].

[3] Instituto Nacional de Antropología e Historia Tabasco (2020). "Vivienda tradicional en Tabasco". INAH Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. https://www.facebook.com/100044814540251/posts/vivienda-tradicional-en-tabascola-vivienda-de-finales-del-siglo-xix-y-principios/672241197036065/ Fecha de consulta 10 de diciembre de 2025.

[4] J. Andrade Narváez, Tabasco, Tipología de vivienda. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México, México. 2017

[5] A. Govea Ek. Los templos católicos en la Chontalpa de Tabasco: Arquitectura, Historia y Memoria. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México.2019

[6] R. Jacinto-Mondragón, 2019. "Arquitectura tradicional de Tabasco". [En línea]. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=axGNKyWGTe4&t=937s [Consultado: 27-nov- 2025].

[7] L.F. Torres Ledesma. La alteración de la vivienda vernácula y su incidencia en el confort térmico. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.2010

[8] M. J. Gallegos Gómora, "Arquitectura tradicional con materiales perecederos en Tabasco". Sistema de información Cultural México, Tabasco, México 2012. [En línea]. Disponible:https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=frpintangible&table_id=129 [Consultado:10-dic-2025].

[9] Pueblos América, "Huimango Cunduacán", Pueblos América, 2022. [En línea]. Disponible: https://mexico.pueblosamerica.com/i/huimango/ [Consultado:11-dic- 2025].

[10] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Compendio de información geográfica municipal. Cunduacán, Tabasco. 2010

[11] Gobierno del Estado de Tabasco, Cunduacán. Municipios. S.f. [en línea]. Disponible: https://tabasco.gob.mx/cunduacan [consultado: 11 -dic-2025].

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6700

Inhibición de corrosión en acero API 5L-X52 mediante extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw*

Corrosion inhibition in API 5L-X52 steel using ethanolic extract of *Tradescantia spathacea Sw*

Estrada-Hernández G. V., Figueroa-Ramírez S.J.*, Sierra-Grajeda J.M.T., Santis Espinosa L.F., Benavides O., De La Cruz-May L.

Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Avenida Central S/N, Esq. con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115, Ciudad del Carmen, Campeche, México
*sfigueroa@pampano.unacar.mx

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

RESUMEN

La corrosión interna de metales representa un problema crítico que genera pérdidas económicas significativas y compromete la seguridad de infraestructuras industriales a nivel mundial. Tradicionalmente, este fenómeno se ha combatido mediante inhibidores químicos sintéticos que, aunque efectivos, presentan alta toxicidad ambiental y riesgos para la salud. Ante esta problemática, la química verde ha impulsado la búsqueda de inhibidores naturales, capaces de ofrecer protección eficiente y sostenible frente a la corrosión.

En este contexto, el sureste de México posee una notable diversidad de flora con propiedades bioactivas de gran potencial. El presente estudio evaluó el extracto etanólico de hojas de *Tradescantia spathacea Sw*. (Maguey morado), recolectadas en la localidad de Nayarit Castellot, Champotón, Campeche. El extracto fue caracterizado mediante técnicas fitoquímicas y espectroscópicas, confirmándose la presencia de polifenoles y grupos funcionales de tipo fenólico mediante espectroscopía UV-Vis y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), compuestos reconocidos por su actividad inhibidora de la corrosión. La eficiencia del extracto fue evaluada sobre acero API 5L-X52 en medio ácido, empleando técnicas gravimétricas y electroquímicas. Los resultados evidenciaron una eficiencia de inhibición máxima del 85% a una concentración de 800 ppm, demostrando su capacidad para reducir significativamente la corrosión en condiciones ácidas. Este trabajo destaca el potencial de la flora regional como fuente de inhibidores verdes, integrando sostenibilidad ambiental y eficiencia técnica con perspectivas de aplicación industrial.

Palabras clave: Corrosión, Inhibidor de corrosión, Extracto de planta, *Tradescantia spathacea Sw.*

ABSTRACT

The internal corrosion of metals represents a critical problem that generates significant economic losses and compromises the safety of industrial infrastructure worldwide. Traditionally, this phenomenon has been addressed using synthetic chemical inhibitors that, although effective, present high environmental toxicity and health risks. In response to this challenge, green chemistry

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

has driven the search for natural inhibitors capable of offering efficient and sustainable corrosion protection. In this context, southeastern Mexico possesses remarkable flora diversity with bioactive properties of great potential. The present study evaluated the ethanolic extract of leaves of *Tradescantia spathacea Sw.* (Maguey morado), collected in the locality of Nayarit Castellot, Champotón, Campeche. The extract was characterized using phytochemical and spectroscopic techniques, confirming the presence of polyphenols and phenolic functional groups through UV-Vis spectroscopy and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), compounds recognized for their corrosion inhibitory activity. The efficiency of the extract was evaluated on API 5L-X52 steel in an acid medium using gravimetric and electrochemical techniques. The results demonstrated a maximum inhibition efficiency of 85% at a concentration of 800 ppm, proving its capacity to significantly reduce corrosion under acidic conditions. This work highlights the potential of regional flora as a source of green inhibitors, integrating environmental sustainability and technical efficiency with prospects for industrial application.
Keywords: Corrosion, Corrosion inhibitor, Plant extract, *Tradescantia spathacea Sw*.

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera del sureste mexicano, el acero al carbono API 5L-X52 es ampliamente utilizado en oleoductos y tuberías. La corrosión interna y externa provocada por ambientes ácidos y salinos representa un problema muy significativo, que implica inversiones anuales de millones de dólares para su mitigación y pérdidas globales equivalentes al 3.4 % del producto interno bruto (PIB) mundial, de acuerdo con estimaciones a escala internacional [1]. Aunque la corrosión es un fenómeno inevitable, su control se logra empleando inhibidores sintéticos, los cuales son tóxicos y restringidos por normativas como ISO 14001.

En este sentido, los inhibidores verdes de origen vegetal han surgido como una alternativa sostenible [2], debido a su baja toxicidad, biocompatibilidad, menor costo y amplia disponibilidad regional, fomentando la innovación y el aprovechamiento de recursos nativos.

En México, el interés por los estudios fitoquímicos de plantas ha crecido en los últimos 20 años, destacando biomateriales de la familia *Commelinaceae*, como *Tradescantia spathacea Sw*. (maguey morado), cuyos compuestos fenólicos, flavonoides, cumarinas y quinonas se asocian con propiedades antioxidantes y diversas aplicaciones en medicina tradicional [3]–[6]. En particular, *Tradescantia spathacea Sw.* ha mostrado actividades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, y recientes investigaciones indican que tanto la extracción con etanol como la decocción son métodos eficientes para recuperar estos metabolitos bioactivos, obteniéndose extractos con alta actividad antioxidante medida mediante los métodos de captación del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), poder reductor férrico (FRP) e inhibición de la quelación de iones ferrosos (FIC), con múltiples usos potenciales [7]. Estos antecedentes respaldan su evaluación como inhibidor verde de corrosión en aceros, en concordancia con las tendencias actuales hacia soluciones más ecológicas y sostenibles.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

En el presente trabajo se presenta la obtención y caracterización del extracto etanólico proveniente de hojas de *Tradescantia spathacea Sw* mediante pruebas fitoquímicas y técnicas espectroscópicas para la identificación de compuestos orgánicos. Asimismo, se evalúa el extracto etanólico como inhibidor verde de corrosión empleando acero API 5L-X52 en medio ácido mediante pérdida de peso y técnicas electroquímicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación del extracto. Las hojas de *Tradescantia spathacea Sw*. (**Figura 1**) fueron recolectadas en la localidad de Nayarit Castellot (Xnoha), perteneciente al Municipio de Champotón, Estado de Campeche, México. El sitio de recolección se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas 19° 13' 26" N (19.22386°) de latitud y 90° 14' 54" O (−90.24837°) de longitud. La recolección se llevó a cabo durante la temporada de primavera, periodo en el que las plantas presentan un desarrollo óptimo y una mayor concentración de metabolitos secundarios.

El muestreo se realizó de manera sistematizada y no probabilística, mediante la selección visual de hojas con base en criterios de calidad previamente establecidos, considerando coloración uniforme y característica de la especie, tamaño representativo y desarrollo completo, así como ausencia de daños visibles por exposición solar o ataque de insectos y otros agentes biológicos.



Figura 1. *Tradescantia spathacea Sw.*

El extracto etanólico se obtuvo mediante el método de maceración. Previo a la extracción, las hojas recolectadas fueron sometidas a un pretratamiento para garantizar la calidad del material vegetal: se lavaron con agua purificada para eliminar impurezas superficiales, polvo y residuos orgánicos; posteriormente se dejaron secar para eliminar el exceso de humedad y se introdujeron en un horno a temperatura controlada hasta obtener peso constante. Una vez secas, las hojas fueron trituradas hasta obtener un material particulado homogéneo.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

Se preparó una solución con 25 g de hojas secas de *Tradescantia spathacea Sw*. y 250 mL de etanol al 95% grado analítico (J.T. Baker), estableciendo una relación sólido-solvente de 1:10 (w/v). La mezcla se mantuvo a temperatura ambiente (25 °C) bajo agitación constante durante 72 h. Posteriormente, la mezcla fue filtrada y el extracto se concentró utilizando un rotavapor (Buchi, modelo R-215) a 70 °C y 65 rpm. Seguidamente, se preparó la solución patrón utilizando el extracto seco y una mezcla agua-etanol en relación 90:10 (v/v) [8]. A partir de esta solución, se prepararon las diferentes concentraciones del inhibidor (200–1000 ppm) en 0.5 M HCl.

Caracterización del extracto. Se realizaron pruebas fitoquímicas cualitativas para identificar los principales compuestos orgánicos presentes en el extracto. Se empleó la reacción de Shinoda, NaOH al 10% (Fermont), grenetina (Knox), $FeCl_3$ al 1% (J.T Baker), reacción con $Pb(CH_3COO)_2$ al 10% (Fermont) y prueba de altura de espuma [9].

El extracto etanólico se analizó mediante espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-Vis) utilizando un espectrofotómetro UV/Visible (Oxford, modelo PMI) en el intervalo de 200 a 800 nm con una velocidad de escaneo de 300 nm min^{-1}, y mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) empleando un espectrofotómetro (Bruker, modelo Tensor I) con una resolución de 4 cm^{-1}, 32 escaneos en un rango de 500 a 4000 cm^{-1} utilizando un ATR con punta de diamante.

La eficiencia de inhibición y la velocidad de corrosión se evaluaron mediante la prueba de pérdida de peso y técnicas electroquímicas.

Siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM G5–94, para la prueba de pérdida de peso se prepararon probetas de acero API 5L-X52, las cuales fueron desbastadas con lijas de carburo de silicio de grano 600, 800, 1000 y 1200.
Seguidamente, se limpiaron con agua desionizada y acetona. El medio corrosivo empleado fue 0.5 M HCl. Las probetas se expusieron tanto en ausencia como en presencia del inhibidor, en concentraciones de 200 a 1000 ppm, durante 3 h y 72 h a temperatura ambiente. La velocidad de corrosión se determinó mediante la Ecuación 1:

$$V = \mathrm{K}\frac{\Delta \mathrm{W}}{\mathrm{DAt}} \qquad (1)$$

Dónde: V es la velocidad de corrosión (mm $año^{-1}$), K es $8.76x10^4$, $\Delta \mathrm{W}$ es la diferencia de peso (antes y después del tratamiento (g), D es la densidad del material (g cm^{-3}), A es el área de exposición (cm^2) y t es el tiempo de exposición (h). El porcentaje de eficiencia del inhibidor (EI) se determinó se determinó mediante la Ecuación 2 [10]:

$$EI\% = \frac{Wo - Wi}{Wo} \times 100 \qquad (2)$$

Dónde: Wo y Wi son las velocidades de corrosión sin inhibidor y con inhibidor, respectivamente.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

En las pruebas electroquímicas se empleó la misma metodología para la preparación de las probetas. Se utilizó una celda electroquímica de tres electrodos: como electrodo de referencia se empleó un electrodo de calomel saturado Hg/Hg_2Cl_2 (SCE), como electrodo auxiliar una barra de grafito y como electrodo de trabajo las probetas de acero API 5L-X52 con área expuesta de 1.95 cm^2. El electrolito fue 0.5 M HCl, y se evaluaron las mismas concentraciones del inhibidor (200–1000 ppm).

Previo a la caracterización electroquímica se midió el potencial de circuito abierto (E_{OCP}) durante 30 min. Se aplicó la técnica de resistencia a la polarización (Rp) con un barrido de ±20 mV vs. E_{corr} a una velocidad de 0.125 mV s^{-1}. La eficiencia de inhibición se determinó mediante la Ecuación 3:

$$IE(\%) = \frac{RPL_{inh} - RPL_0}{RPL_{inh}} \times 100 \qquad (3)$$

dónde RPL_{inh} y RPL_0 son la resistencia a la polarización con y sin inhibidor, respectivamente.

Las curvas de polarización potenciodinámicas se realizaron a un barrido de potencial de ±500 mV vs E_{corr} (ΔE = 1000 mV) a la velocidad de barrido de 0.5 mV s^{-1}. La eficiencia de inhibición (IE) se determinó mediante la Ecuación 4:

$$IE(\%) = \left(\frac{I^0_{corr} - I^{inh}_{corr}}{I^0_{corr}}\right) \times 100 \qquad (4)$$

dónde I^0_{corr} y I^{inh}_{corr} son los valores de densidad de corriente de corrosión sin y con inhibidor, respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de extracción. A partir de la masa del extracto seco y la masa inicial de las hojas empleadas, se determinó el porcentaje de rendimiento (%R), mediante la Ecuación 5:

$$\%\, R = \frac{P_s}{P_i} \times 100 \qquad (5)$$

Dónde: P_s es el peso de extracto seco (g) y P_i es el peso inicial de las hojas (g).

El rendimiento calculado fue del 26%, valor que puede atribuirse a la elevada polaridad del etanol, que favorece la extracción de compuestos bioactivos. Se ha reportado que el tipo de solvente y las mezclas hidrosolventes juegan un papel determinante en la extracción de compuestos activos de materiales vegetales [11]–[13]. El rendimiento obtenido es comparable con lo reportado en la literatura para extractos vegetales ricos en metabolitos secundarios como polifenoles y compuestos fenólicos [14][15].

Caracterización fitoquímica. En la **Tabla 1** se muestran los resultados de las pruebas fitoquímicas realizadas al extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw*. Las pruebas confirmaron la presencia de flavonoides, taninos, compuestos fenólicos y la ausencia de saponinas. La reacción de

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

Shinoda y la prueba con NaOH mostraron coloraciones características de flavonoides (flavonoles, flavonas, flavanonas, chalconas, auronas y xantonas), mientras que la prueba con grenetina confirmó la presencia de taninos. La prueba con $FeCl_3$ indicó derivados de ácido gálico y catecol, y la reacción con $Pb(CH_3COO)_2$ corroboró la presencia de compuestos fenólicos adicionales, incluyendo derivados del ácido cafeico. La prueba de espuma evidenció la ausencia de saponinas [16], [17].

Tabla 1 Pruebas fitoquímicas del extracto etanólico.

Pruebas Fitoquímicas	Resultados		Compuestos Orgánicos identificados
	Resultado	Indicador de presencia	
Reacción de Shinoda	Positivo (+)	Coloración rojo fuerte	Flavonoles, Flavonas, Flavononas, Chalconas, Auronas
Hidróxido de sodio al 10%	Positivo (+)	Coloración amarillo fuerte	Flavonoles, Flavonas, Chalconas, Xantonas
Grenetina	Positivo (+)	Coloración amarillo claro	Taninos
Cloruro férrico al 1%	Positivo (+)	Coloración azul fuerte	Derivados del ácido gálico o catecol
Reacción con acetato de plomo al 10%	Positivo (+)	Precipitado blanco	Taninos, flavonas, flavonoles o ácido cafeico
Prueba de altura de espuma	Negativo (–)	No se presentó la cualidad	Saponinas

La composición fitoquímica del extracto sugiere que los metabolitos secundarios presentes podrían interactuar con la superficie metálica mediante un mecanismo de adsorción. Los compuestos fenólicos y flavonoides contienen heteroátomos con pares de electrones libres —O, N y S— así como insaturaciones por dobles enlaces [18], cuya alta densidad electrónica interactúa con los orbitales d vacíos del metal, favoreciendo la formación de una película orgánica protectora sobre la superficie. Los inhibidores de corrosión más efectivos ejercen su acción inhibidora precisamente a través del mecanismo de adsorción [19], dado que poseen heteroátomos, sistemas de electrones π y anillos aromáticos que facilitan su enlace con los sitios activos del metal [20]. En consecuencia, la presencia confirmada de estos grupos funcionales en el extracto de Tradescantia spathacea Sw., evidenciada mediante los análisis fitoquímicos y espectroscópicos, respalda la propuesta del mecanismo de adsorción como responsable de la actividad inhibidora observada.

Caracterización espectroscópica. El extracto etanólico de *Tradescantia spathacea* se caracterizó mediante espectroscopía UV-Vis para detectar grupos cromóforos y espectroscopia FT-IR para identificar grupos funcionales.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

En la **Figura 2** se muestra el espectro UV-Vis del extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw*. Se observa una banda de absorción máxima a 270 nm, característica de estructuras de tipo flavonoide y grupos fenólicos [21].

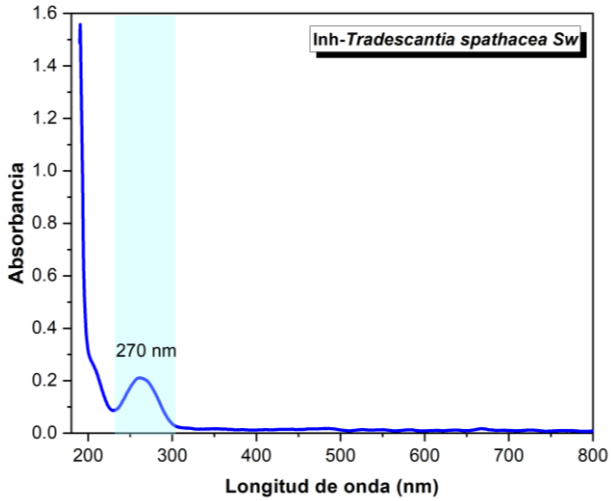


Figura 2 Espectro UV-Vis del extracto etanólico de la *Tradescantia spathacea Sw.*

En la **Figura 3** se presenta el espectro FTIR del extracto etanólico y se identifica una banda de absorción a 3344 cm^{-1} correspondiente al grupo hidroxilo (O-H), con ensanchamiento característico de enlaces por puente de hidrógeno, típico de alcoholes, fenoles y polifenoles (3600–3000 cm^{-1}). Las bandas entre 3000–2850 cm^{-1} corresponden al estiramiento C-H de los grupos metilo y metileno. Las bandas en el rango 1830–1650 cm^{-1} se asocian al grupo carbonilo (C=O). Las bandas a 1600 cm^{-1} y 1450 cm^{-1} corresponden al doble enlace C=C aromático, característico de flavonoides y cumarinas [22], [23].

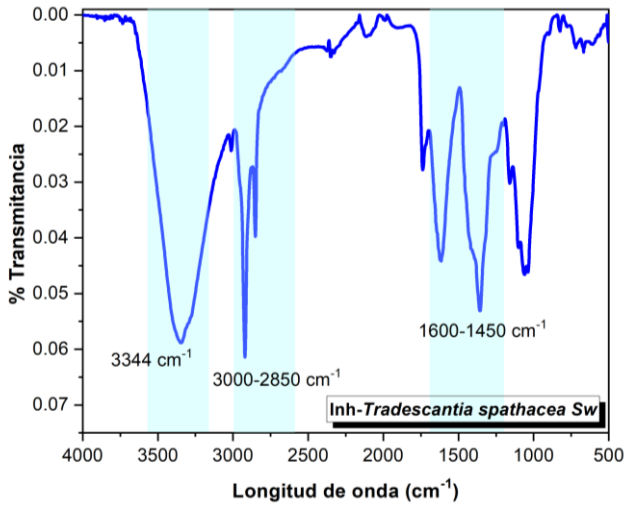


Figura 3. Espectro FTIR del extracto etanólico de la *Tradescantia spathacea Sw.*

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

Evaluación mediante pérdida de peso. Se evaluó la velocidad de corrosión y la eficiencia del inhibidor para el acero API 5L-X52 en 0.5 M HCl, utilizando concentraciones del extracto de 0, 200, 400, 600, 800 y 1000 ppm, con tiempos de exposición de 3 h y 72 h.

La **Tabla 2** muestra los valores de velocidad de corrosión para las distintas concentraciones. En ausencia del inhibidor (0 ppm), la velocidad de corrosión aumenta con el tiempo de exposición, confirmando la susceptibilidad del material al medio ácido. Al incrementar la concentración del extracto, se observó una reducción gradual y consistente de la velocidad de corrosión en ambos tiempos de exposición, siendo la concentración de 800 ppm la que registró los menores valores.

Tabla 2. Valores de la velocidad de corrosión del acero API 5L-X52 mediante pérdida de peso.

Concentración del inhibidor (ppm)	Velocidad de corrosión (mm año^{-1})	
	Tiempo de exposición (h)	
	3	72
0	35.982	0.495
200	16.916	0.245
400	11.683	0.167
600	9.626	0.148
800	6.542	0.097
1000	13.085	0.171

La **Figura 4** muestra la eficiencia del inhibidor en función de la concentración y el tiempo de exposición. La eficiencia aumentó gradualmente al incrementar ambas variables, alcanzando un valor máximo del 82% a 800 ppm. Este comportamiento indica que el extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw.* actúa como inhibidor efectivo contra la corrosión del acero API 5L-X52 en medio de HCl. Resultados similares han sido reportados para otros extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos evaluados en condiciones ácidas comparables. [13],[14].

Evaluación del extracto etanólico mediante técnicas electroquímicas. En **la Figura 5** se presentan los resultados de resistencia a la polarización obtenidos para cada condición experimental. En la **Figura 6** se muestra la variación de la resistencia a la polarización y la eficiencia de inhibición en función de la concentración de acuerdo con la Ecuación 6, a medida que se incrementa la concentración del inhibidor, la resistencia aumenta, alcanzando una eficiencia máxima del 88% a 800 ppm.

$$IE(\%) = \frac{RPL_{inh} - RPL_0}{RPL_{inh}} \times 100 \qquad (6)$$

Donde RPL_{inh} y RPL_0 son la resistencia a la polarización con y sin inhibidor, respectivamente.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

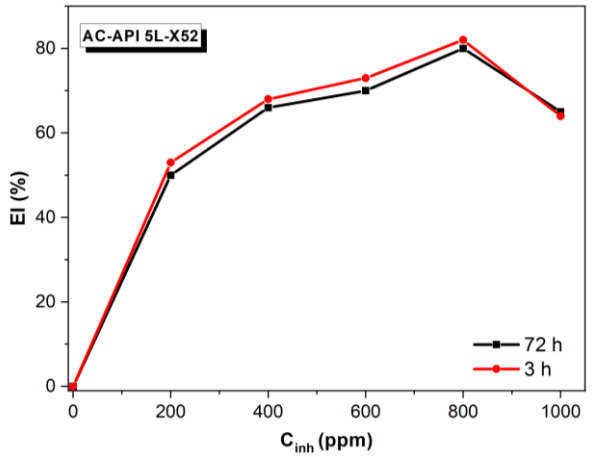


Figura 4. Valores de la eficiencia del inhibidor obtenido para las diferentes concentraciones (ppm) en función del tiempo de exposición.

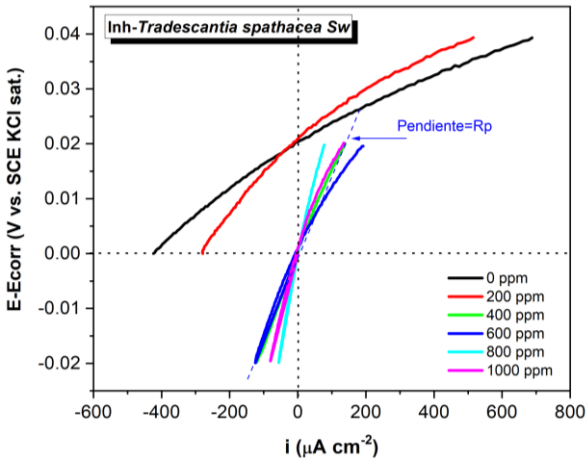


Figura 5. Gráfico Resistencia a la polarización del acero API 5L-X52 en 0.5 M HCl a diferentes concentraciones del inhibidor de *Tradescantia Spathacea Sw.*

Las curvas de polarización potenciodinámicas (**Figura 7**) muestran que el inhibidor desplaza el potencial de corrosión hacia valores más negativos y reduce las densidades de corriente anódica y catódica, con máxima protección a 800 ppm. A 1000 ppm, el incremento de corriente sugiere una saturación del efecto inhibidor.

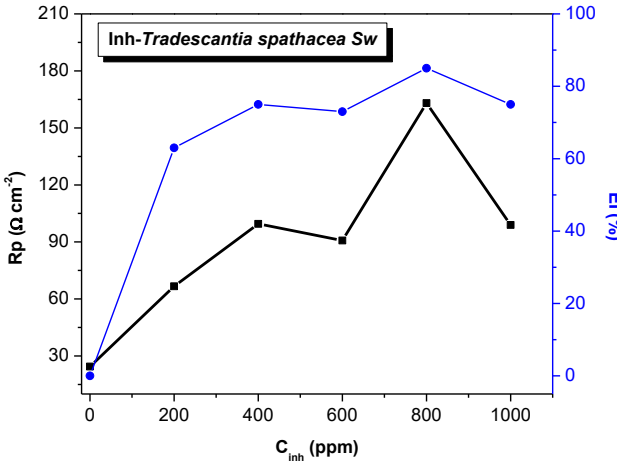


Figura 6 Variación de la resistencia a la polarización y eficiencia de inhibición a diferentes concentraciones.

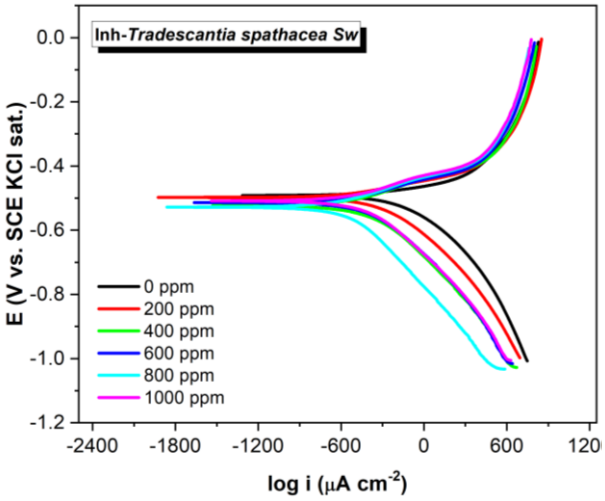


Figura 7. Curvas de polarización obtenidas sobre el acero API 5L-X52 empleado diferentes concentraciones del inhibidor en 0.5 M HCl a 0.5 mV s^{-1}.

En la **Tabla 3** se presentan los parámetros de E_{corr}, i_{corr} y Rp obtenidos. El aumento de Rp y la disminución de la densidad de corriente con mayores concentraciones confirman la reducción de la velocidad de corrosión. La máxima eficiencia (85%) se obtuvo a 800 ppm, mientras que

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

concentraciones de 400–600 ppm mostraron un 74% de protección. A 1000 ppm la eficiencia disminuye, lo que sugiere saturación del inhibidor sobre la superficie metálica se calculó mediante la Ecuación 7 y Ecuación 8:

$$\%\ Eficiencia = \frac{i_{corr,blanco} - i_{corr,inh}}{i_{corr,blanco}} \quad (7)$$

$$\%\ Eficiencia = \frac{Rp_{inh} - Rp_{,blanco}}{Rp_{,inh}} \quad (8)$$

Tabla 3. Parámetros de corrosión obtenidos a partir de las curvas de polarización para el acero API 5L-X52 empleando diferentes concentraciones del inhibidor.

C_{inh} (ppm)	E_{corr}(V)	icorr (μA cm^{-2})	V_{corr} (mm $año^{-1}$)	EI (%)	Rp (cm^{-2})	EI (%)
0	-492.05	250.93	1.60	0	24.41	0
200	-495.59	111.27	0.72	55	66.67	63
400	-521.52	77.73	0.49	69	99.49	75
600	-513.66	78.79	0.50	69	90.77	73
800	-529.06	44.38	0.28	82	163.08	85
1000	-509.34	75.26	0.48	70	98.97	75

La eficiencia máxima de inhibición del 85% obtenida para el extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw*., rico en polifenoles y compuestos fenólicos, a 800 ppm sobre acero API 5L-X52 en medio ácido, es consistente con lo reportado en la literatura. El extracto de hojas de *palma datilera*, con contenido fenólico, alcanzó 85% a 1000 ppm en acero de bajo carbono en medio ácido. El extracto etanólico de *Galium verum*, rico en polifenoles, reportó 91.82% a 400 ppm en acero dulce en medio ácido. Para acero API 5L, el extracto de *Aloe vera* con compuestos fenólicos alcanzó entre 83.75 y 88.60% a 300 mg L^{-1} en medio ácido. En conjunto, la eficiencia obtenida para *Tradescantia spathacea S*w. es competitiva respecto a otros inhibidores verdes de origen vegetal evaluados en condiciones similares [24]–[28].

CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas fitoquímicas mostraron la presencia de polifenoles en el extracto obtenido de las hojas de *Tradescantia spathacea Sw*., con un rendimiento del 26%.

La espectroscopía UV-Vis confirmó la presencia de grupos polifenólicos con estructuras de tipo flavonoide, y el análisis FTIR reveló la presencia de grupos funcionales característicos, principalmente el grupo hidroxilo (O-H) asociado a compuestos fenólicos.

La evaluación del extracto mediante el método gravimétrico mostró una eficiencia de inhibición del 85% con una velocidad de corrosión de 0.097 mm $año^{-1}$ para la concentración de 800 ppm.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

El inhibidor obtenido de *Tradescantia spathacea Sw*. se comporta como un inhibidor de tipo mixto, ya que su presencia sobre la superficie del electrodo disminuye la densidad de corriente tanto en la rama anódica como en la catódica de las curvas de polarización. Asimismo, presenta un efecto predominantemente catódico, evidenciado por el desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más negativos. La máxima eficiencia de inhibición (85%) se alcanzó a una concentración de 800 ppm.

Como líneas de investigación futura se propone determinar los parámetros termodinámicos de adsorción (ΔG°ads, ΔH°ads y ΔS°ads) mediante el ajuste de isotermas de adsorción a diferentes temperaturas, lo cual permitiría confirmar la espontaneidad del proceso y distinguir entre fisisorción y quimisorción, descartando otros mecanismos de protección. Adicionalmente, se sugiere realizar análisis superficiales mediante SEM-EDX y XPS para verificar directamente la formación de la película orgánica protectora sobre el acero API 5L-X52, así como estudios computacionales mediante DFT y dinámica molecular para identificar los sitios activos de los compuestos fenólicos responsables de la interacción con la superficie metálica.

REFERENCIAS

[1] G. Koch, J. Varney, N. Thompson, O. Moghissi, M. Gould y J. Payer, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. Houston, TX, SA: NACE International, 2016.

[2] H. Parangusan, M. H. Sliem, A. M. Abdullah, M. Elhaddad, N. Al-Thani y J. Bhadra, "Plant extract as green corrosion inhibitors for carbon steel substrate in different environments: A systematic review," Int. J. Electrochem. Sci., vol. 20, no. 4, Art. no. 100919, 2025, doi: 10.1016/j.ijoes.2024.100919.

[3] L. E. S. Lopes et al., "Neuroprotective effects of Tradescantia spathacea tea bioactives in Parkinson's disease: In vivo proof-of-concept," J. Tradit. Complement. Med., vol. 14, no. 4, pp. 435-445, 2024, doi: 10.1016/j.jtcme.2024.01.003.

[4] J. Cruz-Maldonado, J. R. Velázquez-Martínez, C. O. Pozo-Leyva, J. Guzmán-Ceferino, A. A. Ochoa-Flores y M. Aurora, "Extracto de Tradescantia spathacea como bioestimulante en el crecimiento y actividades biológicas de Lactobacillus acidophilus y Lacticaseibacillus rhamnosus," Ecosist. Recur. Agropec., vol. 12, no. 1, pp. 1-13, 2025, doi: 10.19136/era. a12n1.4452.

[5] T. Prajapati, A. Shukla y N. Modi, "Tradescantia spathacea Sw.: A review of its pharmacological and ethnopharmacological properties," Int. J. Res. Cult. Soc., pp. 52-56, 2020.

[6] M. Butnariu et al., "A review on Tradescantia: Phytochemical constituents, biological activities and health-promoting effects," Front. Biosci., vol. 27, no. 6, p. 15, 2022.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

[7] J. Ban, L. Tan y Y. M. Kwan, "The biological activities of the spiderworts (Tradescantia)," Food Chem., vol. 317, Art. no. 126411, 2020, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126411.

[8] B. R. Fazal, T. Becker, B. Kinsella y K. Lepkova, "A review of plant extracts as green corrosion inhibitors for CO_2 corrosion of carbon steel," npj Mater. Degrad., vol. 6, no. 1, p. 14, 2022, doi: 10.1038/s41529-021-00201-5.

[9] S. Sasidharan, Y. Chen, D. Saravanan y K. M. Sundram, "Extraction, isolation and characterization of bioactive compounds from plants' extracts," Afr. J. Tradit. Complement. Altern. Med., vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2011.

[10] O. Vergara, Inhibidores de corrosión eficientes a temperaturas por encima de la ambiente, tesis, Univ. Nacional de Colombia, 2018.

[11] I. El Mannoubi, "Impact of different solvents on extraction yield, phenolic composition, in vitro antioxidant and antibacterial activities of deseeded Opuntia stricta fruit," J. Umm Al-Qura Univ. Appl. Sci., vol. 9, no. 2, pp. 176-184, 2023, doi: 10.1007/s43994-023-00031-y.

[12] L. S. Mahdi, N. S. Obaid, M. S. Mahdi y H. Shakir, "Ultrasonic assisted extraction and antimicrobial activity of local Moringa oleifera leaves," Int. J. Med. Toxicol. Leg. Med., vol. 27, no. 5, pp. 437-442, 2024.

[13] C. Bitwell, S. Sen y C. Luke, "A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants," Sci. Afr., vol. 19, Art. no. e01585, 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01585.

[14] N. V. Zagoskina et al., "Polyphenols in plants: Structure, biosynthesis, abiotic stress regulation, and practical applications (Review)," Int. J. Mol. Sci., vol. 24, pp. 2-25, 2023.

[15] N. Akomeng y S. Adusei, "Organic solvent extraction and spectrophotometric quantification of total phenolic content of soil," Heliyon, vol. 7, no. 11, Art. no. e08388, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08388.

[16] J. G. Umiljendić, M. Sarić-Krsmanović y L. Radivojević, "Phytochemical analysis of Asclepias syriaca L. leaf extract and its potential phytotoxic effect on some invasive weeds," Sci. Afr., vol. 15, pp. 1-14, 22025, doi 10.1038/s41598-025-90940-1.

[17] V. Sureshkumar, "Phytochemical screening and thin layer chromatography profiling of various extracts of Achyranthes aspera and Cissus quadrangularis," J. Phytopharmacol., vol. 10, no. 44, pp.225-229, 2021, doi: 10.31254/phyto.2021.10402.

[18] L. Chen y D. Lu, "Organic compounds as corrosion inhibitors for carbon steel in HCl solution: A comprehensive review," Materials, vol. 15, Art. no. 2023, 2023, doi: 10.3390/ma15062023.

[19] C. S. Proença, B. Serrano, J. Correia y M. E. Araujo, "Evaluation of tannins as potential green corrosion inhibitors of aluminium alloy used in aeronautical industry," Metals, vol. 12, no. 3, p. 508, 2022, doi: 10.3390/met12030508.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

[20] R. M. Bandeira et al., "The green plant-based corrosion inhibitors: A sustainable strategy for corrosion protection," Surf. Sci. Technol., vol. 3, p. 19, 2025, doi: 10.1007/s44251-025-00084-7.

[21] F. Guemari, S. E. Laouini, A. Rebiai, A. Bouafia y A. Barhoum, "UV-Visible spectroscopic technique as a reliable, fast, and cost-effective method for the prediction of total polyphenol contents: Validation in a bunch of medicinal plant extracts," Appl. Sci., vol. 12, p. 10, 2022.

[22] I. Shahzadi, S. Munawar, A. Shah, M. M. Shah y T. Ismail, "Antimicrobial potential of silver nanoparticles synthesized using Tradescantia pallida extract," Front. Bioeng. Biotechnol., vol. 10, pp. 1-13, 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.907551.

[23] T. K. Velayutham, J. Thomas, V. P. Raphael y K. Ragi, "Ixora coccinea extract as an efficient eco-friendly corrosion inhibitor in acidic media: Experimental and theoretical approach," Curr. Chem. Lett., vol. 9, pp. 1-12, 2021, doi: 10.5267/j.ccl.2020.12.001.

[24] A. Cojocaru, G. E. Badea, I. Maior, S. Dzitac, O. D. Stănășel y C. D. Ionaș, "Electrochemical investigations of Galium verum ethanolic extract as a steel corrosion eco-inhibitor in the acid media: An unexpected versatility of plant chemistry," Materials, vol. 18, no. 99, p.2078, 2025, doi: 10.3390/ma18092078.

[25] H. Lgaz y H. Lee, "Computational exploration of phenolic compounds in corrosion inhibition: A case study of hydroxytyrosol," Materials, vol. 16, p. 6159, 22023, doi 10.3390/ma16186159.

[26] A. A. Adamu, O. Risikat, A. Iyun y J. D. Habila, "Adsorption and thermodynamic studies of the corrosion inhibition effect of Desmodium adscendens (Swartz) extract on carbon steel in HCl," BMC Chem., vol. 19, p. 163, 2025, doi: 10.1186/s13065-025-01541-y.

[27] M. H. Samat y S. Yahya, "Experimental and theoretical studies on extract of date palm seed as a green anti-corrosion agent in hydrochloric acid solution," Molecules, vol. 26, p. 3535, 2021, doi: 10.3390/molecules26123535.

[28] M. Shahidi y M. R. Gholamhosseinzadeh, "Mentha spicata L. extract as a green corrosion inhibitor for carbon steel in HCl solution," Chem. Res., vol. 5, no. 2, p. 15, 2017, doi: 10.22036/pcr.2017.41160.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6699

Efecto de las nanoparticulas metálicas sobre el crecimiento de la microalga *Coelastrella sp.* para la producción de biocombustible

Effect of metal nanoparticles on the growth of the microalga *Coelastrella sp.* for the production of biofuels

Santis-Espinosa L.F[1*], Figueroa-Ramírez S.J.[1], Vargas-Estrada L.[2], López-Vidaña E.C.[3]

[1]Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Carmen. Av. Central S/N Esq. Con Fracc. Mundo Maya, C.P. 24115. Ciudad del Carmen, Campeche, México.
[2]Laboratorio de Bioenergía, Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México. Privada Xochicalco S/N, C.P. 62580. Temixco, Morelos, México.
[3]Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Sede Durango, Durango.

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

RESUMEN

El interés en el uso de microalgas se debe a su composición bioquímica, que permite la obtención de productos de alto valor, captadores de CO_2, pigmentos, fuentes sostenibles de biocombustibles y biofertilizantes. Además, tiene una capacidad de crecimiento y de generación de biomasa hasta 50 veces más rápido que las plantas. Para la producción de biodiésel se requieren microalgas que produzcan un alto contenido de lípidos en tiempos cortos de crecimiento. Recientemente, se ha demostrado que la aplicación de nanopartículas en microalgas durante el ciclo de cultivo mejora la tasa de crecimiento, la producción de lípidos y la biomasa. El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes condiciones de estrés, por la adición nanopartículas de óxidos metálicos (Fe_2O_3) y ausencia de nitratos, en la cepa *Coelastrella sp*. cultivada en medio BG-11 (Blue-Green Medium) en un periodo de 15 días y con agua residual durante 14 días en este periodo se llevó a cabo el monitoreo de la cinética de crecimiento, los cambios fisiológicos y moleculares de la microalga y de la tasa específica de crecimiento. Se puede destacar que la microalga *Coelastrella sp.* crece satisfactoriamente con la adición de 20 mg L^{-1} de nanopartículas de Fe_2O_3. Las microalgas con cultivadas, bajo esta concentración de Fe_2O_3 en agua residual, favorece a la producción de biomasa.
Palabras clave: Microalgas, *Coelastrella sp.*, nanopartículas metálicas, biocombustibles.

ABSTRACT

The interest in the use of microalgae is due to its biochemical composition, which allows obtaining high-value products, CO_2 collectors, pigments, sustainable sources of biofuels and biofertilizers. In addition, it has a capacity for growth and biomass generation up to 50 times faster than plants. To produce biodiesel, microalgae that produce a high lipid content in short growth times are required. Recently, it has been shown that the application of nanoparticles in microalgae during the culture cycle improves growth rate, lipid production and biomass. The objective of this study was to evaluate different stress conditions, due to the addition of metal oxide nanoparticles (Fe_2O_3) and the absence of nitrates, in the *Coelastrella sp*. cultured in BG-11 (Blue-Green Medium) medium

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

for a period of 15 days and with residual water for 14 days during this period, monitoring of the growth kinetics, physiological and molecular changes of the microalgae, and the specific growth rate was carried out. It can be highlighted that the microalga Coelastrella sp. grows satisfactorily supplemented with 20 mg L^{-1} of Fe_2O_3 nanoparticles grown in wastewater and that the addition of nanoparticles favors biomass production.
Keywords: Microalgae, *Coelastrella sp.,* Metal nanoparticles, biofuels.

INTRODUCCION

Para responder al cambio climático actual, al menos la mitad de la producción de energía hacia el 2030 debería provenir de tecnologías bajas o cero emisiones [1]. Entre las energías renovables, la bioenergía se destaca por su aspecto único de reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y su capacidad para llevar a cabo la absorción de carbono [2]. Una de las propuestas con mayor auge en la obtención de bioenergía, incluyen como materia prima el uso de microalgas puesto que son microrganismos que tienen capacidades fotosintéticas efectivas comparadas con las plantaciones de cultivos bioenergéticos, que están compuestos, principalmente por proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas y minerales y pigmentos, lo que permite la obtención de productos de alto valor. *Coelastrella* es un género de algas verdes de la familia *Scnedesmus*, la especie de este género muestran una alta propensión a acumular carotenoides y ácidos grasos, especialmente ácidos grasos poliinsaturados omega-6 (n-6) a omega-3 (n-3) y muestran una buena resistencia a diversos tipos de estrés. Algunas especies también se han propuesto para aplicaciones en biorremediación, eliminación de nutrientes y producción de nanopartículas [3].

Existen diversas limitaciones con las tecnologías disponibles, asociadas con altos costos en la producción de biocombustibles y en los tiempos de operación a escala industrial. Los procesos adaptados para la conversión de diversos tipos de materias primas al producto deseados son diferentes dependiendo de las diversas técnicas y materiales utilizados.

El uso de nanomateriales en la investigación de biocombustibles se ha convertido en una herramienta prometedora para mejorar la producción de biocombustibles al superar los desafíos fisicoquímicos y biológicos del procesamiento de biomasa. Las nanopartículas (NPs) tienen múltiples ventajas frente a otras fuentes macroscópicas gracias a su mayor área superficial, para la síntesis de biocombustibles debido a su tamaño, a la elevada relación superficie/volumen y atributos especiales como un grado significativo de cristalinidad, actividad catalítica, capacidad de adsorción y estabilidad términos de selectividad, eficiencia energética, tiempo de gestión, reducción de costos [4] [5].

Recientemente Vargas-Estrada et al., demostró la optimización de la tasa de crecimiento, la absorción de CO_2, la producción de lípidos y la biomasa se ha utilizado la aplicación de nanopartículas metálicas en microalgas durante el ciclo de cultivo, considerando la concentración, origen, tamaño y los compuestos de estas nanopartículas [6].

En este estudio se manejó la especie de microalga *Coelastrella* sp evaluando las condiciones de estrés bajo diferentes ambientes de cultivo, por la adición de nanopartículas de óxidos metálicos

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

(Fe_2O_3) con diferentes concentraciones, ausencia de nitratos, cultivada en un medio BG-11 (Blue-Green Medium) las primeras 3 corridas y las ultimas 2 con agua residual (AR) obtenida de la planta de tratamiento del Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER, UNAM), en este periodo se llevó a cabo el monitoreo de la cinética de crecimiento, los cambios fisiológicos y moleculares de la microalga y de la tasa específica de crecimiento.
Se puede destacar que la microalga *Coelastrella* sp. crece satisfactoriamente suplementado con 20 mg L^{-1} de nanopartículas de Fe_2O_3. Los resultados muestran que la adición de nanopartículas mejora el crecimiento de la microalga y por ende la producción de biomasa.

METODOLOGÍA

En la **Figura 1** se muestra el diseño experimental donde se cultivó en un medio BG-11 dividida en tres corridas (C1, C2 y C3) y las últimas dos corridas (C4 y C5) fueron cultivadas en agua residual. Se determinó la cinética poblacional, la densidad óptica, la clorofila, el total de sólidos suspendidos, la remoción de nutrientes en el agua residual (AR); y al finalizar el tiempo de cada cultivo, se separó la microalga por el método de centrifugación (3000 rpm, 5 minutos), se secó mediante una liofilizadora (-110 °C, 0.049 hPa), para realizar la extracción de lípidos.

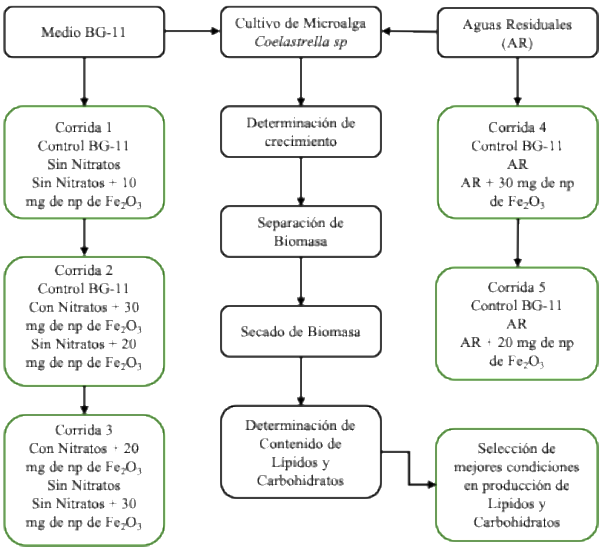


Figura 1. Metodología experimental.

Calidad de Agua. Existen diversas limitaciones con las tecnologías disponibles, asociadas con altos costos en la producción de biocombustibles. El tratamiento de aguas residuales mediante el sistema de microalgas ha sido reportado con eficiencias del 90%, la producción de biomasa con alto nivel de lípidos y carbohidratos y el acoplamiento del tratamiento de aguas residuales a la producción de biocombustibles a partir de la biomasa generada [7].
Descripción del Agua Residual. Para el cultivo de las microalgas se utilizó agua residual proveniente de la planta de tratamiento del IER, UNAM.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

Acorde con la descripción de Vargas Estrada, 2023, la planta de tratamiento de AR consta de un depósito colector de cribado, que se dirige a un decantador primario donde se separan los sólidos sedimentables.

Las aguas residuales se canalizan a dos digestores aeróbicos y después a un separador de sólidos de alta carga para separar los lodos secundarios. Los lodos secundarios se recirculan al decantador primario y el agua tratada se dirige a un tanque de desinfección donde se añade hipoclorito sódico. Por último, el agua tratada pasa por un filtro de arena y grava para su eliminación final. **Figura 2.**

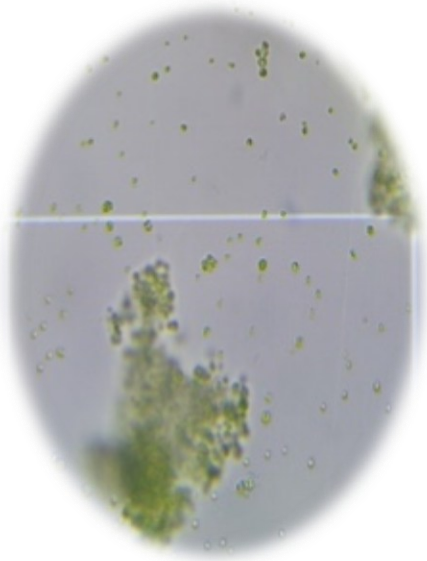


Figura 2. Microalga *Colastrella sp*., cultivada en un medio de control (BG-11). Microscopio óptico Amscope en condiciones de 10x.

Pre-cultivo. La cepa de la microalga Coelastrella sp pertenece a la colección de cultivos del Laboratorio de Bioenergía del IER, la cepa fue donada por Universidad Autónoma de Morelos (UAM). Se aisló por la técnica de rayado en estrías en una caja de Petri con agar [8], en un medio de BG-11 una temperatura de 4°C. Las células de las microalgas crecieron a temperaturas de 22 a 29°C en ciclos de luz/oscuridad, resembrando hasta obtener un aislado puro. El medio BG-11 empleado para esta investigación se ha preparado con las instrucciones de Culture Collection of algae and Protozoa, en su última revisión en el 2020 [9] [10]. **Figura 3.**

El pre-cultivo de la microalga *Coelastrella* sp se incubó en un medio SK-Enriquecido en matraces Erlenmeyer de 250 mL. Los matraces se incubaron con luz led, a temperatura ambiente (22 a 29°C), con agitación continua (300 rpm) para evitar la sedimentación del cultivo.

Cuando el inóculo alcanzó la fase estacionaria a los 8 días de cultivo. Una muestra de 5 mL fue centrifugada a 4000 rpm, 5 minutos. El sobrenadante se retiró cuidadosamente y el pellet se resuspendió en agua destilada. El proceso se repitió varias veces para asegurar el lavado de la

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

biomasa. Posteriormente, se determinó la cncentración de TSS de acuerdo con métodos estandarizados.

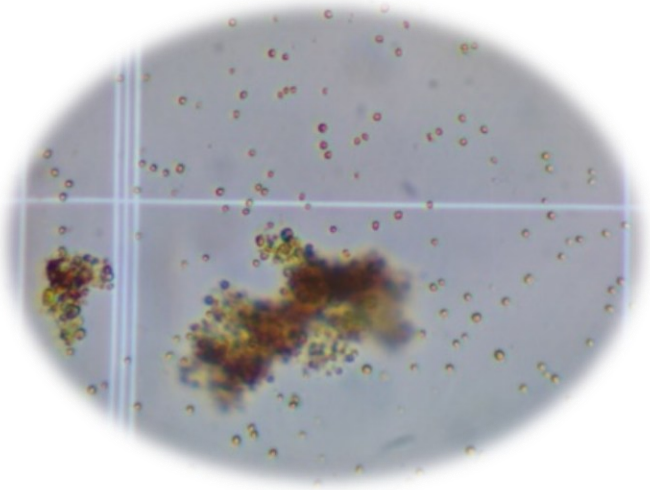


Figura 3. Adición de 20 mg NPs Fe_2O_3 cultivada en un medio BG-11 sin nitratos. Microscopio óptico Amscope a 10x.

Morfología. *Coestrella* es un género de algas verdes de la familia *Scenedesmus* (*Scenedesmaceae)* fue descrito por R. Chodat, 1922 [11]. Antes de la división celular, las células maduras son casi esféricas y miden (8.5) 9.7–14 (18.5) µm de diámetro. Las células envejecidas cambian frecuentemente de color a rojo ladrillo/naranja [3].

Tabla 1. Parámetros de cultivo.

No. Corridas	1	2	3	4	5
Días de Cultivo	15	15	15	14	14
	Corrida BG-11	Control BG-11	Con Nitratos + 20 mg de np de Fe_2O_3	Control BG-11	Control BG-11
Medios de Cultivo	Sin Nitratos	Con Nitratos + 30 mg de np de Fe_2O_3	Sin Nitratos	Agua Residual (AR)	Agua Residual (AR)
	Sin Nitratos + 10 mg de np de Fe_2O_3	Sin Nitratos + 20 mg de np de Fe_2O_3	Sin Nitratos + 30 mg de np de Fe_2O_3	AR + 30 mg de np de Fe_2O_3	AR + 20 mg de np de Fe_2O_3

Datos de experimentación.
Volumen: 0.5 L
Rango de temperatura: 17 a 28 ºC
Intensidad de Luz: 33 a 38 Lux

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

Aplicación de nanopartículas como suplemento de micronutrientes. Las estrategias actuales para mejorar los cultivos y maximizar la concentración de biomasa microalgal, se centran en el cultivo mixotrófico, la optimización de nutrientes mediante alimentación intermitente, y la adición de fuentes de carbono y espectros de luz específicos para lograr altas densidades celulares de biomasa [12].

En las corridas establecidas en el diseño de experimentos, mostrados en la **Tabla 1**, se añadieron nanopartículas metálicas de Fe_2O_3 a los medios de cultivo con 10 mgL^{-1}, 20 mgL^{-1} y 30 mgL^{-1}. Se prepararon soluciones stock con concentraciones diferentes evaluando el rendimiento del cultivo.

Parámetros de cultivo. Los siguientes parámetros de cultivo fueron elaborados en el laboratorio de Bioenergía del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) de agosto a diciembre del 2022. Las condiciones experimentales a escala laboratorio en biorreactores en matraces Erlenmeyer de 0.5 L la C1, C2 y C3 con un medio BG-11, la corrida C4 y la C5 se cultivó con agua residual variando la concentración de NPs metálicas. Se llevo a cabo el cálculo de TSS para determinar el volumen del inóculo inicial. Las muestras se analizaron por triplicado bajo las condiciones descritas en la Tabla 1. La concentración de la biomasa fue determinada con la cinética de crecimiento la cual se determinó diariamente con una cámara de Neubauer mejorada a un aumento de 10x con un microscopio óptico Amscope®. El peso en seco medido al inicio y al final de cada experimento se realizó filtrando 10 mL de la muestra a través de filtros de fibra de vidrio de 47 nm y secándolos a 105°C, hasta alcanzar peso constante, acorde los métodos estándar, (APHA-AWWA-WPCF,1999). La densidad óptica fue medida diariamente con un espectrofotómetro UV-2550 Shimadzu Japan a 750nm. La determinación de clorofila se midió cada tercer día acorde el método de Vargas Estrada, 2023 [13], se midió la densidad óptica a una longitud de onda de 663 nm y 645 nm, calculada con la fórmula:

$$Chlorophyll\ a\ \left(\frac{mg}{L}\right) = (12.7 * A_{663}) - (2.6 * A_{645}) \qquad (1)$$

Donde, las corridas C4, C5 se determinó cada 2 o 3 días la remoción del amonio NH_4^+, acorde con Sólorzano, 1969 [14]. Para el caso del anásis del fósforo total, fue medido de acuerdo con fosfo-vanadiomolibdato, establecido en los métodos estándar, APHA-AWWAWPCFC,1998 [15]. Este análisis se determinó cada dos días durante el tiempo establecido de cultivo (promedio de 15 días), considerando la curva de cinética de crecimiento hasta la etapa estacionaría.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética Población de *Coelastrella sp.* En la **figura 4** se muestran las siguientes gráficas donde se representa la cinética poblacional de *Coelastrella* sp, esta medición se realizó mediante en una cámara de Neubauer mejorada la cual tiene 0.1mm de profundidad y una reglilla con nueve cuadrados de 1mm por cada lado, cada uno de los cuales corresponde a un volumen de 0.1µL. Se tomaron 100µL del caldo del cultivo, las cuales fueron diluidas con agua destilada para la viabilidad en el conteo celular.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

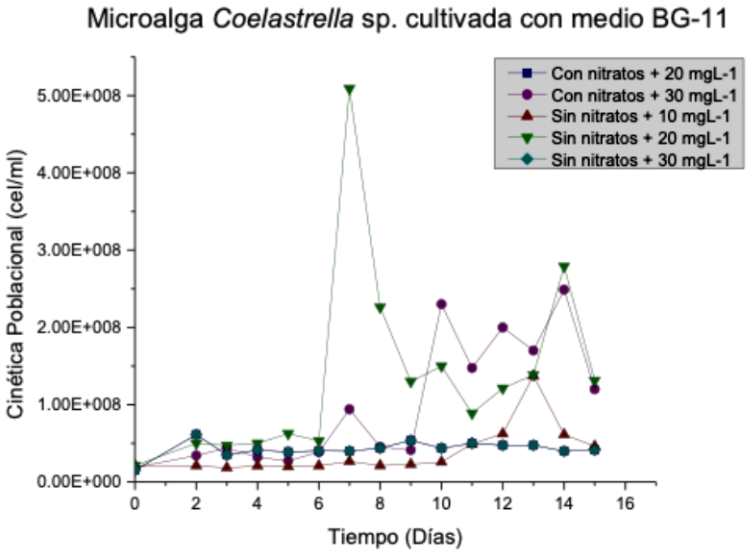


Figura 4. Cinética poblacional de la microalga *Coelastrella sp*, para medio de control (BG-11) y diferentes concentraciones de Fe_2O_3 .

Se realizaron las corridas establecidas en el diseño experimental, donde fueron variadas las condiciones en el medio de cultivo BG-11 (con nitratos, sin nitratos) y se adicionaron nanopartículas metálicas de Fe_2O_3 con diferentes concentraciones, 10 mgL^{-1}, 20 mgL^{-1} y 30 mgL^{-1}, respectivamente, descritas en la tabla 1. Se observa que se obtuvieron variaciones en el crecimiento para cada condición de medio de cultivo. Los puntos donde decrece la curva y luego aumentaba, se asocian a la variación de velocidades de crcimiento de los microorganismos. Del día 1 al día 5 presentan la fase logaritmica, del día 6 al 11 la fase exponencial, del 12 al día 13 la fase estacionaria y del día 14 al 16 se observa la fase de muerte en los microorganismos.
Como se observo en la figura 4, se demostró que las condiciones con un crecimiento representativo fueron las de medio de cultivo BG-11 sin nitratos adicionando 20 mgL^{-1} y 30 mgL^{-1} de NPs Fe_2O_3, la cual se procedió a cultivarse en agua residual de la planta de tratamiento del IER-UNAM.

En la **Figura 5**, se evalua cualitativamente la cinética poblacional y se observa que en ambas condiciones no inhibe el crecimiento, pero suplementando con 20 NPs Fe_2O_3 la cinética de crecimiento fue más representativa.

La remoción de NH_4^+ y PO_4^-

Durante el cultivo de las corridad 4 y 5 se evaluó la asimilación de amonio (NH_4^+) y fosfato (PO_4^-) a partir de la planta de tratamiento de agua residuales del IER-UNAM. La concentración de NH_4^+ y PO_4^- en cada biorreactor se monitoreaba cada 72 horas, por triplicado durante los 14 días de medición del estudio.

En la **Figura 6**, se observa el consumo de NH_4^+ y PO_4^-, realizado por la microalga *Coelastrella* sp durante el periodo de crecimiento, en ambas condiciones la velocidad y consumo de nutrientes se

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

dio durante los 14 días del cultivo, mismas que permitió el crecimiento óptimo del microorganismo, esto quiere decir que hubo un consumo algar activo. Las tasas de remoción alcanzadas por *Coelastrella sp.* en ambos nutrientes fue casi en su totalidad. El rendimiento rendimiento obtenido muestra que el uso de la microalga podría ser implementado para tratar aguas residuales y ser aprovechas con fines de irrigación de cultivo.

Las concentraciones obtenidas de nutrientes en esta investigación son insuficientes para lograr concentración de biomasa algar significativa, esto se justifica ya que el agua residual de cultivo esta previamente tratada.

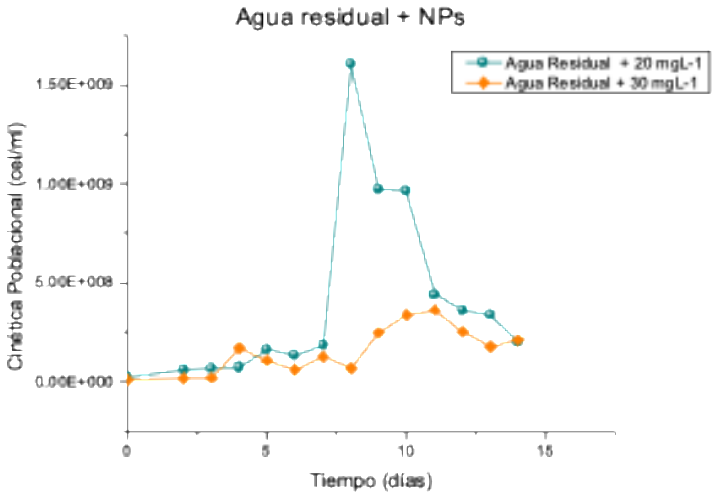


Figura 5. Cinética Poblacional con adición de nanopartículas metálicas Fe_2O3 cultivadas en Agua Residual de la planta de tratamiento del IER-UNAM.

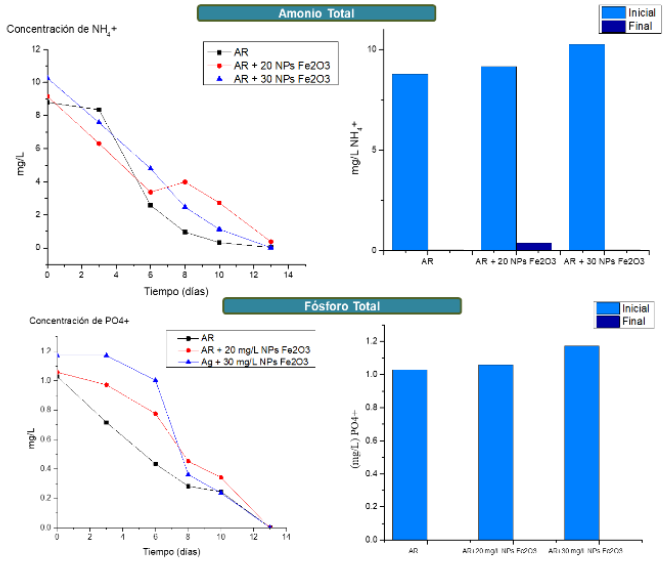


Figura 6. Consumo de nutrientes de NH_4^+ y PO_3^- contenidos al inicio y final del estudio.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

Análisis del contenido bioproductos de la biomasa. La cuantificación de lípidos y carbohidratos totales expuesto en la **Tabla 2** y **Figura 7**, muestran que un porcentaje del 14% de lípidos en peso seco para el medio de Agua Residual + 20 NPs de Fe_2O_3, seguido de 11% para Agua Residual + 30 NPs de Fe_2O_3, 10% de Agua Residual y el 12% para el Control. y para la cuantificación de los carbohidratos un 22% Agua Residual + 20 NPs de Fe_2O_3, 20% Agua Residual + 20 NPs de Fe_2O_3, 19% de Agua Residual y un 18% para el control.

Tabla 2. Concentración de lípidos y Carbohidratos

Composición de Biomasa	Lípidos*		Carbohidratos**	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estandar
Control	11.761	0.593	19.255	0.725
Agua Residual	10.211	1.825	19.136	3.162
Agua Residual + 30 NPs	11.152	3.462	19.863	0.674
Agua Residual + 20 NPs	13.495	2.537	21.920	0.326

*: Método Bligh y Dyer (B & D) o Folch utilizando cloroformo/metanol/agua.
**: Método Dubois.

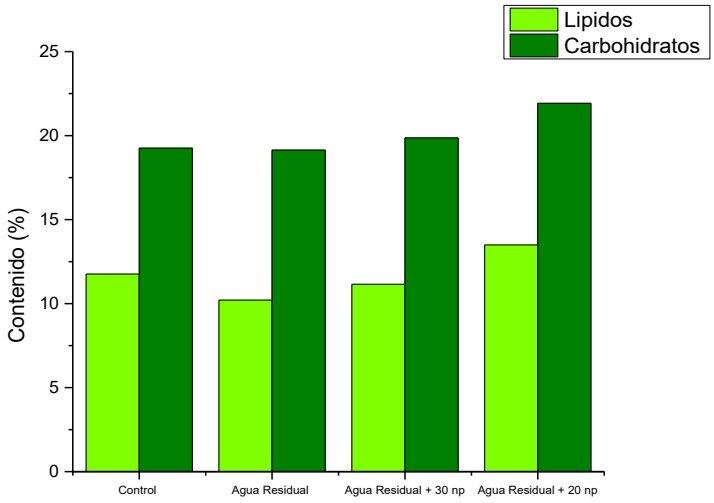


Figura 7. Concentración de lípidos y carbohidratos obtenidos al final del estudio.

Análisis FITR de la biomasa seca previa y posterior a la extracción de lípidos. Para el análisis de espectrometría como patrón de referencia se utilizó un aceite comercial de marca patrona (A), para el medio de control con agua residual (AR)(B), el Agua Residual más 20 mg de NPs Fe_2O_3 (20 NPs)(C). En las gráficas se pueden observar el área de interés de 1700 cm^{-1} a 1750 cm^{-1}, representando los ésteres (C=O) y los grupos metilo y metileno (CH_2 y CH_3). Arenas reporta que

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

[16], utilizando otro aceite de referencia como el aceite de coco, las bandas correspondientes con grupos de triacilglicéridos (TAGs) que correspondes a los picos de la banda alrededor de 1745 $cm^{-1.}$

Las variaciones en los picos se pueden asociar a que los extractos aún pueden tener restos de biomasa, agua u otras biomoléculas que fueron arrastradas durante la extracción.

El análisis FTIR se aplicó con la biomasa liofilizada antes y después de la extracción vía Soxhelt para tener referencia de la presencia de compuestos como carbohidratos y proteinas. Se analizarón muestras sin nanopartículas, con nanopartículas y después de la extracción de lípidos. Dada la longitud de las bandas del espectro, sólo podemos observar que la medición corresponde a los carbohidratos y a las proteínas. **Figura 8.**

Otros estudios indican que la biomasa obtenida se puede conisiderar para más de un bioenergético, así como el valor económico de productos y coproductos [14].

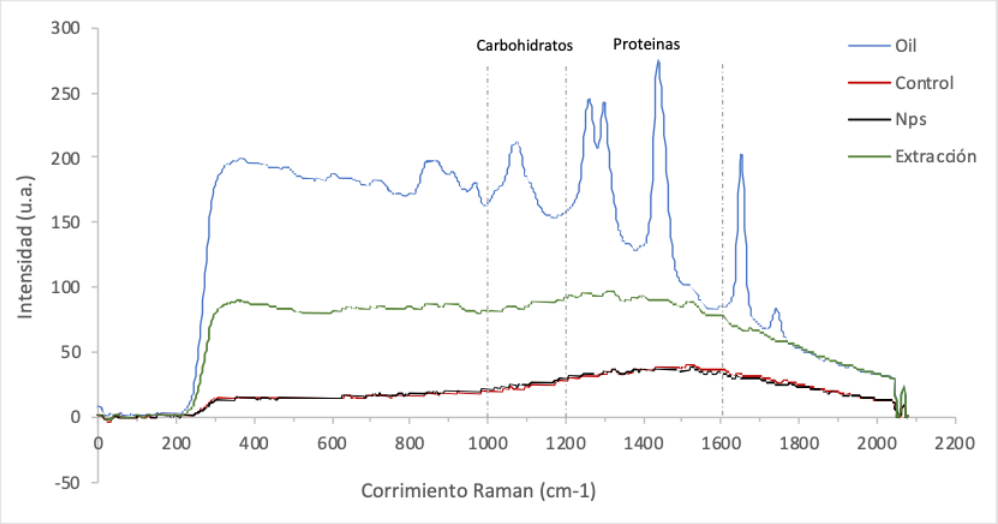


Figura 8. Análisis de espectroscopia Raman de la biomasa seca de Coelastrella sp. antes y después de la extracción de aceite.

CONCLUSIÓN

La microalga *Coelastrella sp*. tienen la capacidad de adherir nanopartículas metálicas, dado que su estructura y la composición química no inhibe su crecimiento.

Las nanopartículas metálicas favorecieron el crecimiento celular y el aumento de carbohidratos en la concentración de biomasa algal.

Se puede destacar que la microalga *Coelastrella sp.* crece satisfactoriamente en medio BG-11 suplementado con 20 mg L-1 de nanopartículas de Fe_2O_3.

Los efectos de la adición de nanopartículas metálicas en el cultivo de la microalga *Coelastrella sp* favorece la concentración de azúcares y proteínas, como lo indicaron la presencia de bandas espectrales en los análisis de FTIR.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

Por el contrario, la presencia de lípidos fueron insipientes. Por otra parte, el cultivo de las microalgas contribuye a la mitigación de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) al fijar el CO_2 del ambiente, asimismo, en la biorremediación de las aguas residuales.

REFERENCIAS

[1] L. Dogaru, "The main goals of the fourth industrial revolution: Renewable energy perspectives," Procedia Manuf., pp. 397–401, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.058.

[2] E. E. S. L. Dias et al., "Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits," Land Use Policy, vol. 105, Art. no. 105346, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.landusepol.2021.

[3] M. M. S. D. G.-S., J. Á. L.-J., M. A. S. Boutarfa et al., "The Green Microalga Coelastrella thermophila var. globulina (cenedesmaceae, Chlorophyta) Isolated from an Algerian Hot Spring as a Potential Source of Fatty Acids," Life, vol. 12, no. 44,,.560, Apr. 2022, doi: 10.3390/life12040560.

[4] C. O. Onwosi et al., "Applications of nanomaterials in biofuel production," in Nanomaterials for Bioreactors and Bioprocessing Applications. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2023, pp. 83–118, doi: 10.1016/B978-0-323-91782-7.00001-1.

[5] I. A. et al., "Current trends and future prospects of nanotechnology in biofuel production," Catalysts, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/catal11111308.

[6] L. Vargas-Estrada et al., "Role of nanoparticles on microalgal cultivation: A review," Fuel, vol. 280, Art. no. 118598, Nov. 22020, doi 10.1016/j.fuel.2020.118598.

[7] A. R. E. Sevilla, Cultivo de Chlorella sp. para tratamiento terciario de aguas residuales. México, D.F., México: Instituto Politécnico Nacional, 2016.

[8] C. J. Band Schmidt, "Aislamiento, purificación y mantenimiento de cepas de microalgas," en Métodos y Herramientas en la Evaluación de la Biomasa Microalgal, La Paz, B.C.S., México, 2007, p. 97.

[9] C. C. on Algae and Aquatic Technologies, "BG-11 Medium Recipe," Nov. 2022.

[10] Culture Collection of Algae and Protozoa, "Medio BG-11," Oban, Argyll, United Kingdom, Nov. 2019.

[11] R. Chodat, "Matériaux pour l'histoire des algues de la Suisse," Bull. Soc. Bot. Genève, 1922.

[12] E. Kadar et al., "The effect of engineered iron nanoparticles on growth and metabolic status of marine microalgae cultures," Sci. Total Environ., vol. 439, pp. 8–17, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.09.010.

[13] L. G. V. Estrada, "Effect of nanoparticles on microalgae culture and biogas upgrading," tesis de maestría y doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, México, 2023.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

[14] L. Solórzano, “Determination of ammonia in natural waters by the phenolhypochlorite method,” Limnol. Oceanogr., vol. 14, pp. 799–801, 1969, doi: 10.4319/lo.1969.14.5.0799.

[15] American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. Washington, DC, USA: APHA, 1998.

[16] E. A. Guerrero, Estudio de la microalga Verrucodesmus verrucosus como fuente potencial para la producción de lípidos con fines bioenergéticos y de bioremediación ambiental. Temixco, Morelos, México: Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6698

Influencia de material dopante en un polímero de silicón sometido a tratamientos de plasma de aire a baja presión

Influence of dopant material on a silicone polymer subjected to low-pressure air plasma treatments

Alarcón-Hernández F.B.[1]*, Fuentes-Albarrán M. del C.[1], Paredes-Olguín M.[2], Avelar-Domínguez F.[1], Gadea-Pacheco J.L.[1], Sandoval-González A.[3]

[1]Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Avenida Nicolas Bravo s/n, Xalostoc CP 62725 Ayala, Morelos, México.
[2] Universidad Politécnica del Valle de México
Avenida Mexiquense, esq, Av. Universidad Politécnica s/n, CP 54910 Fuentes del Valle, Estado de México, México.
[3]Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C
Parque Tecnológico Querétaro SN, CP 76703 San Fandila, Querétaro, México.
*honorato@uaem.mx

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

ABSTRACT

The effect of incorporating a dopant material into a silicone polymer was analyzed when exposed to low-pressure air plasma. Square composite samples of silicone rubber (Momentive RTV615) were used. Five undoped samples and five samples doped with fumed silica (SiO_2) nanoparticles (Aerosil R812) at a concentration of 1.0% of the total volume were used. The plasma was applied in a vacuum chamber (20 Torr) and generated (20 mA, 4000 V) using a high-voltage source (SPELLMAN SL600). Five plasma exposure times were considered (0.0, 1.0, 5.0, 10.0, and 15.0 min). In general, incorporating the dopant modifies the polymer's initial properties. It reduces changes in response to plasma treatments, attenuates degradation, stabilizes hydrophobicity, and moderates optical changes. The dopant is an effective option for controlling and optimizing the response of surface-modified polymers to plasma. The influence of its volume on the variables of interest remains to be analyzed.
Keywords: Percentage mass loss; hydrophobicity; transmittance; polydimethylsiloxane.

INTRODUCTION

The modification of polymer surfaces is highly relevant today due to its direct impact on key properties, including hydrophobicity, surface energy, adhesion, and chemical functionality. These modifications directly affect the advanced applications of these polymers across multiple areas of knowledge.

Polymers, while possessing attractive intrinsic properties (lightweight, elastic, and easy to process), are often chemically inert at their surfaces, which limits their performance in applications that require controlled interaction with liquids or other materials [1]. Among the most studied polymers is silicone, especially in the form of silicone rubber. This polymer is notable for its natural

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

hydrophobicity, making it useful for protective and insulating coatings, but it also poses challenges when surfaces with greater affinity or surface functionality are desired [2].

One strategy considered for adjusting the functional properties of polymers involves incorporating dopants into the polymer matrix of interest. The addition of nanoparticles or dopants can significantly alter the properties of the resulting composite, including hydrophobicity, electrical conductivity, and mechanical response. In the case of silicon doped with metal oxide nanoparticles (e.g., TiO_2, CeO_2, or carbon black), recent studies have observed variations in surface topography and wetting behavior that can even lead to superhydrophobic states when combined with appropriate micro- or nanostructural roughness [2-6].

Concurrently, low-pressure plasma treatments have proven effective for modifying the surface characteristics of polymers without affecting their bulk properties. Non-thermal plasmas generate reactive species (radicals, ions, electrons) that interact with the polymer surface, causing bond breakage, the introduction of polar functional groups, and, to some extent, the removal of contaminants; this leads to measurable changes in surface free energy and contact angle [7-9]. These studies have shown that air plasma treatment can modify the hydrophobicity of polymeric materials, rendering them more hydrophilic or hydrophobic, depending on the parameters used (exposure time, power, pressure) and the plasma gas composition.

The combination of polymer doping and plasma treatments opens a field in which not only can surface properties be adjusted, but also specific effects on the material's internal structure and its response to the plasma can be explored. Doped polymeric materials can exhibit changes not only in surface hydrophobicity but also in the distribution of functional groups and in the chemical response to plasma species, which can influence the stability of the modification and hydrophobic recovery over time [10]. Plasma functionalization studies indicate that incorporating oxygenated or fluorinated groups via reactive gases (oxygen, nitrogen, or fluorine-containing gases) can create highly functional surfaces with improved adhesion or increased water repellency [11].

Doping silicone polymers with low-pressure air plasma suggests a route to modify surface properties, especially for applications in smart coatings, biomedical devices, and sealing or encapsulation systems that demand optimized surface properties. Therefore, this study aims to determine the influence of a dopant on a silicone polymer after low-pressure air plasma treatment.

EXPERIMENTAL METHODOLOGY

Study Polymer. Square composite samples measuring 1.0 cm on each side and 0.05–0.06 cm thick were used. These samples were obtained from a larger polymer measuring 6.0 cm on each side and 0.3 cm thick, with a silicone rubber matrix (Momentive RTV615), as shown in **Figure 1**.

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

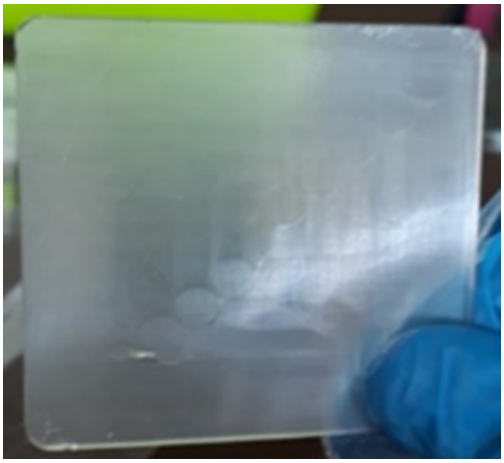


Figure 1. Figure 1. Doped polymer with dimensions of 6.0 cm per side and 0.3 cm thickness from which the study material was obtained.

Five undoped samples and five samples doped with fumed silica (SiO_2) nanoparticles (Aerosil R812) at a concentration of 1.0% by volume were considered. The initial polymer (doped and undoped samples) was prepared while the material was still in the liquid phase. For the doped samples, the dopant material was mixed using high-shear mechanical mixing (HS). Subsequently, the samples were consolidated by hot pressing (HP). All study samples were cleaned with ethanol one day before exposure to plasma.

Experimental setup. **Figure 2** shows a schematic of the experimental apparatus used. It consists of a hermetically sealed glass chamber, two aluminum electrodes (a tip and a rectangular base), a vacuum system (digital vacuum gauge: CPS, vacuum pump: LABCONCO), and a high-voltage power supply (SPELLMAN SL600).
The negative electrode is located at the bottom of the chamber, while the positive electrode is located at the top. The composite sample of interest is placed between both electrodes, so that it is directly exposed to the plasma generated during the treatment. Each sample is exposed to plasma for a specific time. After this time, the treatment is stopped, and the sample is removed.

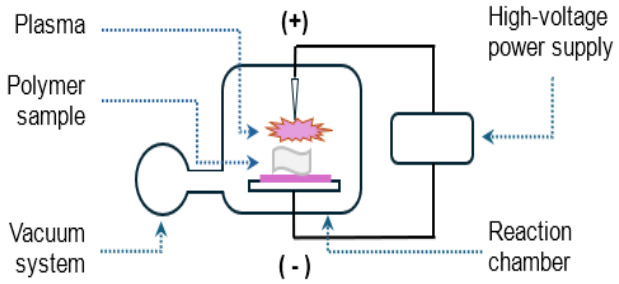


Figure 2. Schematic of the experimental device for plasma treatment.

Exposure of polymers to air plasma. The plasma treatments of the samples of interest consisted of exposing each polymer sample to low-pressure air plasma (20 Torr) for a specific time. The plasma generation parameters were fixed (20 mA, 4000 V), as was the distance between electrodes

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

(1.0 cm). The variable that determined each treatment was the polymers' exposure time to the plasma, along with whether the material was doped or undoped. **Table 1** presents the values considered for each treatment.

Table 1. Plasma exposure time values used according to treatment

Sample	Exposure time (min)
Control sample	00.0
1	01.0
2	05.0
3	10.0
4	15.0

Measurement of variables of interest. The changes generated in the study samples due to the dopant and the exposure time to the plasma treatments were determined by measuring the change in mass (analytical balance: AE-ADAM, model PW254), hydrophobicity (sessile droplet technique, digital microscope: Black 1600X Microscope), and infrared transmittance (Alpha FITR spectrometer, Bruker Optics).

Specifically, hydrophobicity was determined by measuring the internal angle between the surface of interest and a droplet of distilled water (a small angle indicates a hydrophilic surface, a large angle indicates a hydrophobic surface), as shown in **Figure 3.**

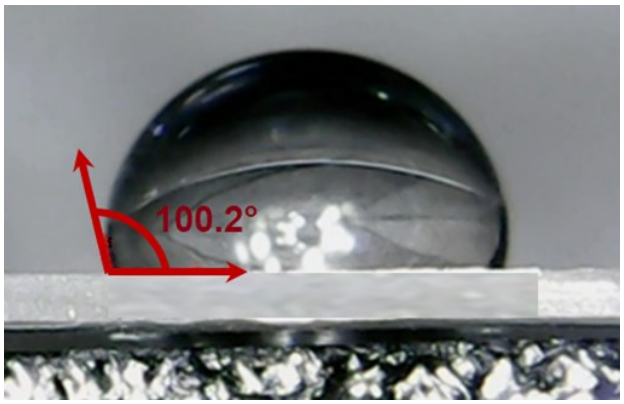


Figure 3. Measurement of the contact angle (hydrophobicity)

RESULTS

Exposure of the polymers to air plasma produced different effects in the doped and undoped samples, depending on the exposure time. The results for mass loss, changes in hydrophobicity, and infrared transmittance spectra for all samples are presented.

Percentage change in mass. **Figure 4** shows the behavior of the percentage change in mass of the doped and undoped samples of the polymer under study. It can be observed that, for both polymers, there is mass loss as a function of exposure time, regardless of whether the material was doped.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

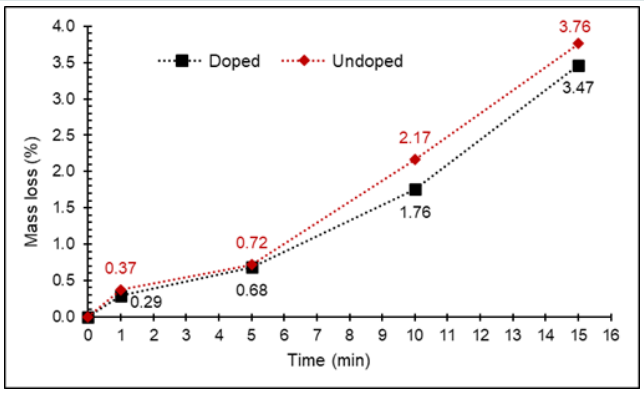


Figure 4. Percentage change in mass of the polymers of interest as a function of exposure time and the presence of the doping

In particular, it can be observed that both polymers (doped and undoped) showed greater mass loss as exposure time increased. However, for the doped material, the mass loss percentage was lower at all plasma exposure times (01.0, 05.0, 10.0, and 15.0 min). These results show that doping material inhibits the percentage of mass loss.

Hydrophobicity. The hydrophobicity of the samples (doped and undoped) exposed and unexposed to plasma was determined by measuring the contact angle formed between the surface of interest and the water droplet. The larger the measured angle, the greater the hydrophobicity.
Figure 5 shows the measured angle values for the respective materials studied.

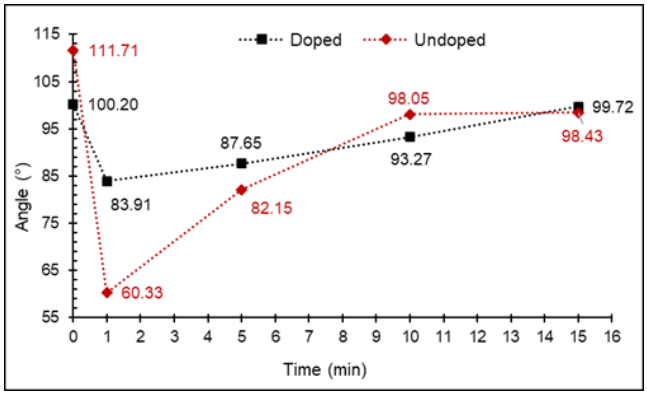


Figure 5. Angle measures as a function of exposure time to air plasma

From the graph, it can be observed that exposure to air plasma decreases the water contact angle in both polymers at all times, indicating reduced surface hydrophobicity, especially at short treatment times. The undoped polymer initially exhibits greater hydrophobicity and a more pronounced response to plasma, reaching a maximum reduction in contact angle after 1.0 minute of exposure. In contrast, the doped polymer shows a more moderate decrease, suggesting that doping limits or stabilizes the plasma-induced surface modification. At longer exposure times, a progressive increase in the contact angle is observed in both materials, approaching the initial values. Both doping and exposure time significantly influence the polymer's hydrophobicity.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

Infrared Transmittance. Figures 6 and **7** show the total transmittance spectra of the polymers under study (doped and undoped, respectively) after plasma exposure. Apparently, no difference is observed between the spectra for the different exposure times of each polymer.

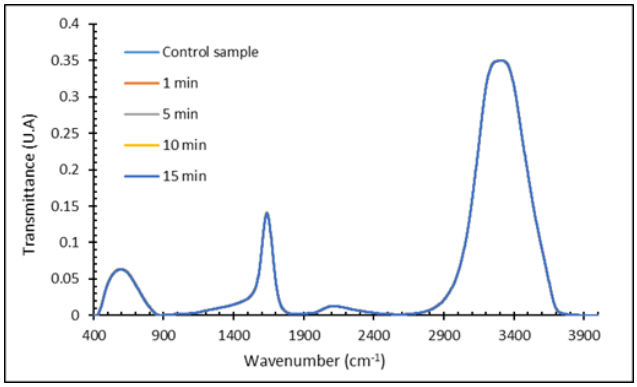


Figure 6. Infrared transmittance of the doped polymer after exposure to plasma for different times.

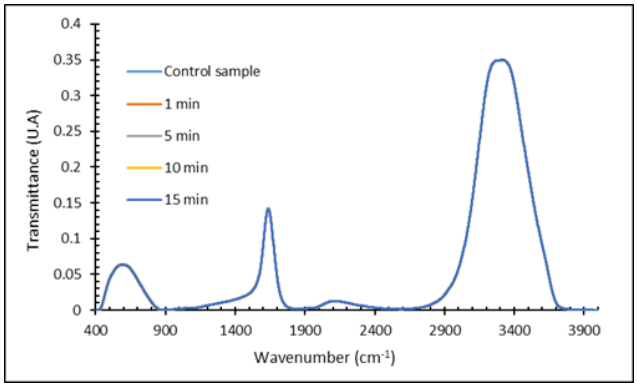


Figure 7. Infrared transmittance of the undoped polymer after exposure to plasma for different times.

An analysis of both figures (Figures 6 and 7) at wavenumbers between approximately 565 and 625 cm^{-1} and 1620 to 1650 cm^{-1} reveals different intensity behaviors, as shown in **Figures 8 and 9** (doped polymer) and **Figures 10 and 11** (undoped polymer).

When comparing the infrared transmittance intensity of the doped materials across different exposure times, both figures (**Figures 8 and 9**) show that the transmittance changes with exposure time. The highest transmittance is observed for the material exposed to the plasma for the shortest time (1 min). As the exposure time increases, the transmittance decreases until it approaches the value of the control sample.

For the undoped material **(Figures 10 and 11**), the control sample (0.0 min) exhibits the highest transmittance intensity in both intervals. In this case, transmittance decreases as plasma exposure time increases.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

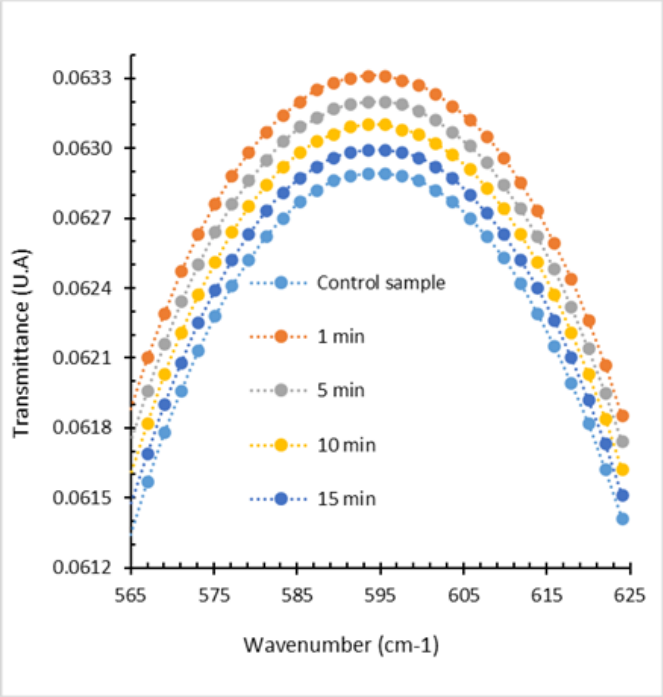


Figure 8. Infrared transmittance of the doped polymer after different plasma exposure times. Range (565 to 625 cm^{-1}).

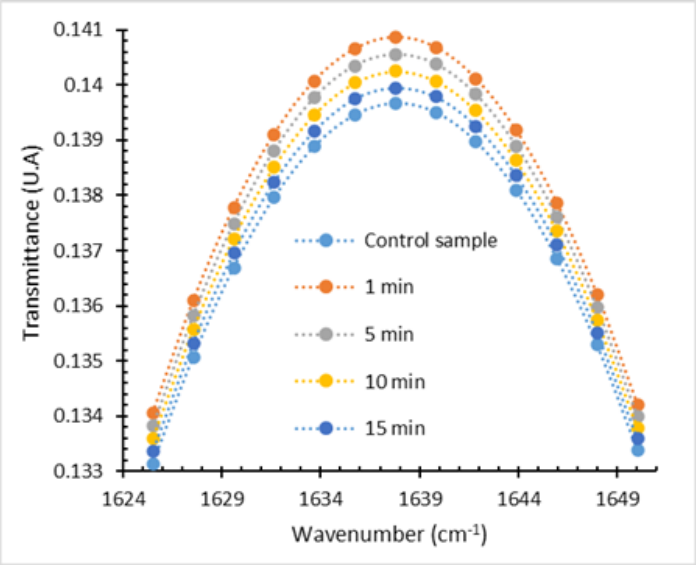


Figure 9. Infrared transmittance of the doped polymer after different plasma exposure times. Range (1620 to 1650 cm^{-1}).

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

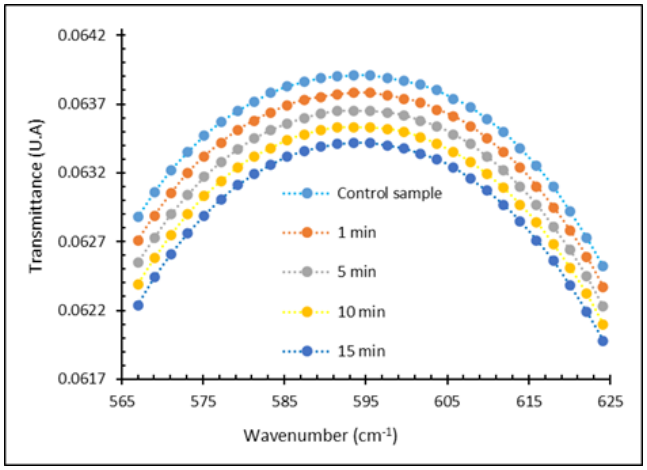


Figure 10. Infrared transmittance of the undoped polymer after different plasma exposure times. Range (565 to 625 cm^{-1}).

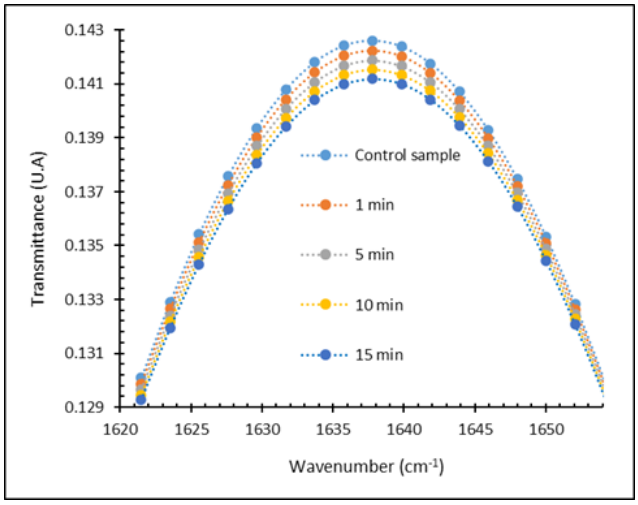


Figure 11. Infrared transmittance of the undoped polymer after different plasma exposure times. Range (1620 to 1650 cm^{-1}).

The dopant and plasma exposure times alter the transmittance intensity of the polymers. F**igures 12 and 13** show the maximum transmittance values for both polymers (doped and undoped) at wavenumbers 593.51 cm^{-1} and 1637.78 cm^{-1}, respectively; these figures illustrate the effects of the dopant and plasma exposure time on transmittance.

In both figures (12 and 13), specific results are observed. The transmittance is always higher for the undoped material than for the doped material at all plasma exposure times. The transmittance value decreases as the plasma exposure time increases. The greatest difference in transmittance value between the two materials is observed for the sample without plasma exposure. The doping material alters the initial transmittance and mitigates the plasma's effect, making the material more resistant to modifications induced by the discharge.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

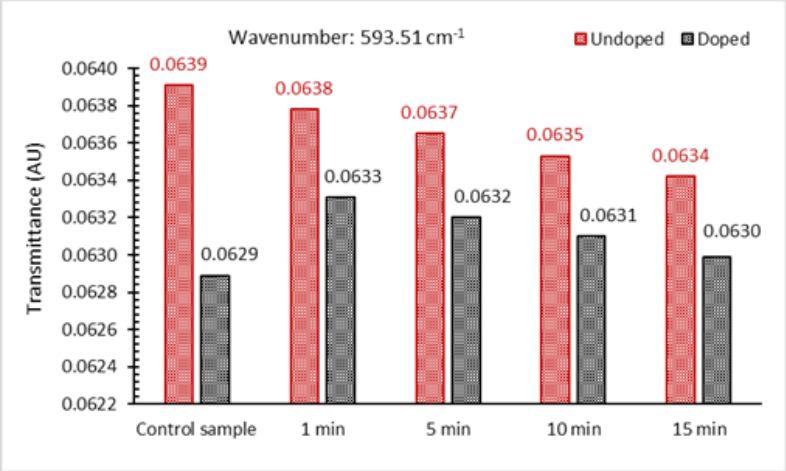


Figure 12. Infrared transmittance values for doped and undoped polymers as a function of plasma exposure time at a specific wavenumber.

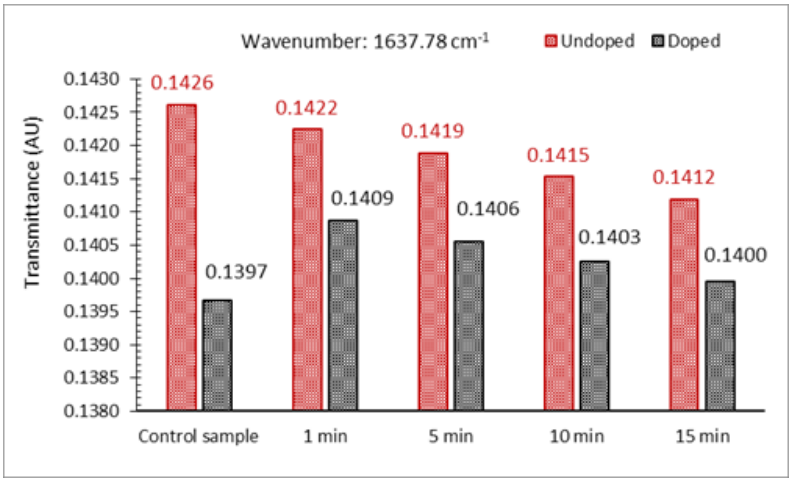


Figure 13. Infrared transmittance values for doped and undoped polymers as a function of plasma exposure time at a specific wavenumber.

DISCUSSION

Air plasma treatments generate reactive species (radicals and ions) that trigger physicochemical processes in the material under study, such as functionalization with oxygenated groups, generation of free radicals via polymer chain cleavage, and removal of contaminants or additives. These modifications can alter roughness, induce variations in crosslinking density, and significantly increase surface energy, thereby enhancing the substrate's wettability [12, 13]. In the specific case of silicone polymers (polydimethylsiloxane, or PDMS), the substitution of methyl groups with reactive oxygen results in a passivation layer rich in glassy Si–O–Si bonds, which modifies the optical transmittance properties [14]. The prevalence of these mechanisms depends on the process kinetics and ionization density, with primary functionalization often transitioning to degradation or crosslinking under higher-power regimes or longer exposure times [15, 16]. The hydrophobic

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

recovery phenomenon also persists, partially restoring the initial surface characteristics after treatment [17].

It is observed for both materials (doped and undoped) that the percentage of mass loss increases with increasing plasma exposure time. For short exposure times (5.0 min), the percentage of mass loss is low in both cases, indicating that the processes are superficial and gradually increase. This behavior is explained by the interaction of reactive species in the low-pressure air plasma (ions, radicals, electrons) with the polymer surface, breaking bonds and generating gradual material removal (etching). These physical and chemical effects are highly dependent on the exposure time and the energy supplied to

the ionizing gas (ion bombardment, oxidation, UV radiation) [18]. At the molecular level, the interaction of plasma with PDMS involves cleavage of the siloxane (Si–O) and methyl (CH_3) bonds in the polymer chain, followed by the formation of volatile oxidation products. Furthermore, the presence of silica nanoparticles can locally modify the density of reactive species and the energy distribution on the surface, influencing the surface ablation rate and the etching effect, thus modulating the mass loss between the doped and undoped material as the treatment duration increases [19].

Likewise, the bombardment of energetic plasma ions causes sputtering or microetching, processes that intensify with plasma exposure time and account for the increase in percentage mass loss observed in both data curves [19]. Chemically, oxygen or nitrogen radicals formed by ionizing the air used can interact with the organic matrix of PDMS, forming transient bonds that break, releasing volatile fragments (ethylene glycol, silicon oxides) that are evacuated in the vacuum system, contributing to surface degradation of the materials [2].

The observed trend (percentage mass loss) can also be attributed to structural modifications in the PDMS surface layer, including plasma-induced cross-linking and subsequent microcrack formation and local embrittlement. These processes facilitate the removal of chain segments when the polysiloxane network is sufficiently damaged, especially in the presence of strain concentrators associated with silica nanoparticles, which act as fracture initiators under high plasma species density [2]. Taken together, ionic etching, chemical oxidation, and polymer network modification explain the progressive mass loss, which intensifies with increasing exposure time to low-pressure air plasma, but is less pronounced in the doped material. In other words, the incorporation of dopant particles helps attenuate the material's mass loss.

Regarding the change in hydrophobicity in both materials, it was observed that doping with R812 nanoparticles in the silicone polymer modifies surface hydrophobicity both before and after plasma treatment. This can be deduced from the measured contact angles (angles greater than or equal to 90° indicate a hydrophobic surface).

When the materials are not exposed to plasma (0.0 min), the undoped sample exhibits a larger angle (~111.7°) than the doped sample (~100.2°), suggesting that the dopant initially reduces surface hydrophobicity slightly. This is likely due to the interaction between the dopant nanoparticles and the silicone matrix, which modifies the surface topography and energy without further treatment. The above behavior is consistent with research showing that the incorporation of nanoparticles into a polymer matrix can change surface roughness and energy, varying the contact angle measurement

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

depending on the size, dispersion, and surface chemistry of the particles (PDMS with SiO_2 showed angle variation according to nanoparticle content and size) [20].

Plasma treatments generate changes with similar trends, but of varying intensity, in the materials (doped and undoped). In the undoped samples, the plasma causes a very pronounced drop in the contact angle in the first few minutes (from 111.7° to 60.3° at 1.0 min), indicating a strong generation of polar functional groups and an increase in surface energy that makes the surface more hydrophilic, as often occurs with air or oxygen plasma treatments that introduce oxygenated groups and temporarily increase the wettability of some polymers, in this case, PDMS [2].

For the doped samples, although there is also an initial reduction in the angle at the beginning of the treatment (from 100.2° to 83.9° at 1.0 min), this decrease is less extreme than in the undoped samples, and the contact angles of the doped samples recover more rapidly to hydrophobic values (~99.7° at 15 min), approaching their initial state. In general, it is observed that the doping material introduces a certain degree of stability to
the hydrophobicity under plasma treatments.

This behavior can be explained by the fact that silica nanoparticles, especially when dispersed, generate a rougher, more heterogeneous surface topography that favors the recovery or preservation of hydrophobicity after post-plasma surface reorganization. This has been observed in nanocomposites where the nanoparticles increase water repellency by increasing roughness and creating Cassie-Baxter-type wetting states (air trapped between micro/nanostructures) [20].

Plasma treatment has been observed to activate polymer surfaces by introducing polar groups. At long exposure times or after surface reorganization of the polymers, these effects (changes in hydrophobicity) can be mitigated by molecular rearrangement. This effect is favored by the presence of nanometric particles that stabilize surface roughness and reduce the mobility of polymer chains at the interface [2]. Taken together, these results suggest that the SiO_2 dopant attenuates the transformation induced by plasma treatments and promotes faster recovery to the initial state, likely due to a combination of physical (roughness) and chemical (particle-polymer interaction) modifications at the material's surface.

Considering the changes in infrared transmittance of the doped and undoped polymer samples, it can be observed that the values are modified. In both cases, the transmittance generally decreases with increasing plasma exposure time, indicating that the material has undergone chemical and/or structural modifications at its surface or near-surface region, which increase the absorption of infrared radiation. In particular, plasma treatment often induces the formation of new polar functional groups such as –OH, C=O, Si–O–Si, or Si–OH, depending on the polymer and the plasma gas. In the specific case of PDMS, it causes the breaking of $Si–CH_3$ bonds and the formation of Si–O, Si–OH, or oxidized bonds, increasing infrared absorption and thus reducing the recorded transmittance. Oxidation, crosslinking, or surface densification processes also occur, all of which are associated with additional or more intense vibrational modes that absorb energy in the infrared [21, 22]. Furthermore, the reduction in transmittance may be related to an effective increase in the absorption coefficient resulting from the thickening of a plasma-modified surface layer, often described as an oxidized or oxide-like layer. In some cases, the plasma can also generate

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

microdefects, roughness, or changes in optical density, thereby increasing scattering and reducing the amount of transmitted radiation.
On the other hand, when PDMS is doped with silica nanoparticles, these SiO_2 particles can serve as additional oxidation and functionalization sites, facilitating surface reactions and generating additional vibrational states that absorb infrared radiation.
This results in a smaller net change in transmittance than in pure PDMS, due to the effects of solid packing and possible saturation of reactive sites [22].

Furthermore, the more moderate decreasing trend in the doped samples indicates that the silica matrix may be promoting a more stable plasma energy distribution and reducing the rate of surface chemical modification, consistent with studies of polymeric composites with fillers that show lower sensitivity to plasma effects but with surface changes detectable by FTIR [22].
Overall, it can be inferred that plasma exposure induces surface oxidation and increases the abundance of polar groups that absorb more efficiently in FTIR, reflected in reductions in transmittance. Likewise, the dopant moderates these changes by acting as an interaction and redistribution site for reactive species, leading to a less pronounced spectral evolution over time.

CONCLUSION

Exposure of the polymer (doped and undoped) to plasma generates progressive modifications that depend on time and the presence of the doping material. The magnitude and kinetics of these changes differ significantly between the doped and undoped samples.
In both experiments, a percentage mass loss associated with etching, oxidation, and ion bombardment mechanisms is observed. The doped polymer consistently exhibits less mass loss at all exposure times. Regarding hydrophobicity, both polymers exhibit an initial decrease in contact angle after plasma exposure, attributed to the incorporation of polar functional groups and the resulting increase in surface energy. However, the doped polymer exhibits a weaker response and a faster recovery to values close to the initial ones as the treatment time increases. Both behaviors (percentage mass loss and change in hydrophobicity) are evidenced by infrared transmittance measurements, confirming that the plasma induces detectable structural and chemical changes in both materials, reflected in a decrease in transmittance with exposure time. Similarly, the doped polymer exhibits a more moderate attenuation of transmittance intensity.
Taken together, these results demonstrate that incorporating the dopant not only modifies the initial properties of the polymer but also reduces changes in response to plasma treatments, attenuating degradation, stabilizing hydrophobicity, and moderating optical changes. From this perspective, the dopant appears to be an effective option for controlling and optimizing the response of plasma-modified polymers. Further analysis is needed to determine the influence of the dopant volume in the polymer on the variables of interest.

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc of Universidad Autónoma del Estado de Morelos, for the facilities provided to carry out this research. This work was funded by PRODEP [DSA/103.5/14/10703].

REFERENCES

[1] R. E. Ñañez Azaña, Modificación superficial de polímeros por tratamientos químicos y físicos, tesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2021. [En línea]. Disponible: https://tesis.pucp.edu.pe/items/ef7f9cd5-3d77-4994-b9fd-1307b9758756

[2] L. B. Neves, I. S. Afonso, G. Nobrega, L. G. Barbosa, R. A. Lima y J. E. Ribeiro, "A review of methods to modify the PDMS surface wettability and their applications," Micromachines, vol. 15, no. 6, p. 670, 2024, doi: 10.3390/mi15060670.

[3] A. Córdoba, E. M. Rivera-Muñoz, R. Velázquez-Castillo y K. Esquivel, "PDMS/TiO_2 and PDMS/SiO_2 nanocomposites: Mechanical properties' evaluation for improved insulating coatings," Nanomaterials, vol. 13, no. 10, p. 1699, 2023, doi: 10.3390/nano13101699.

[4] K. Wei, X. Feng, H. Jiang, C. Li y Y. Hu, "Improvement of heat resistance in silicone rubber by Fe-doped TiO_2 nanoparticles prepared via flame spray pyrolysis," Eur. Polym. J., vol. 200, Art. no. 113139, 2024, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113139.

[5] Y. Yu, L. Chen, D. Weng, Y. Hou, Z. Pang, Z. Zhan y J. Wang, "Effect of doping SiO_2 nanoparticles and phenylmethyl silicone oil on the large-scale deicing property of PDMS coatings," ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 14, no. 42, 2022, doi: 10.1021/acsami.2c13650.

[6] S. Gao, H. Zhao, N. Zhang y J. Bai, "Enhanced electromechanical property of silicone elastomer composites containing TiO_2@SiO_2 core-shell nano-architectures," Polymers, vol. 13, no. 3, p. 368, 2021, doi: 10.3390/polym13030368.

[7] T. Dufour, "From basics to frontiers: A comprehensive review of plasma-modified and plasma-synthesized polymer films," Polymers, vol. 15, no. 17, p. 3607, 2023, doi: 10.3390/polym15173607.

[8] M. Bertin, E. M. Leitão, S. Bickerton y C. J. R. Verbeek, "A review of polymer surface modification by cold plasmas toward bulk functionalization," Plasma Process. Polym., vol. 21, no. 2, Art. no. e202300208, 2024, doi: 10.1002/ppap.202300208.

[9] G. Primc, "Surface modification of polyamides by gaseous plasma: Review and scientific challenges," Polymers, vol. 12, no. 12, p. 3020, 2020, doi: 10.3390/polym12123020.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

[10] T. Tsuzuki, K. Baassiri, Z. Mahmoudi, A. S. Perumal, K. Rajendran, G. Montiel Rubies y D. V. Nicolau, "Hydrophobic recovery of PDMS surfaces in contact with hydrophilic entities: Relevance to biomedical devices," Materials, vol. 15, no. 6, p. 2313, 22022, doi 10.3390/ma15062313.

[11] M. Iqbal, D. K. Dinh, Q. Abbas, M. Imran, H. Sattar y A. U. Ahmad, "Controlled surface wettability by plasma polymer surface modification," Surfaces, vol. 2, no. 22, pp.349–371, 2019, doi: 10.3390/surfaces2020026.

[12] J. Tyczkowski, J. Balcerzak, J. Sielski y I. Krawczyk-Kłys, "Effect of carbon black anofiller on adhesion properties of SBS rubber surfaces treated by low-pressure plasma," Polymers, vol. 12, no. 3, p. 616, 22020, doi 10.3390/polym12030616.

[13] J. Tyczkowski, H. Kierzkowska-Pawlak, J. Sielski y I. Krawczyk-Kłys, "Low-temperature plasma modification of styrene-butadiene block copolymer surfaces for improved adhesion: A kinetic approach," Polymers, vol. 12, no. 4, p. 935, 2020, doi: 10.3390/polym12040935.

[14] M. Bodas, J.-Y. Rauch y C. Khan-Malek, "Surface modification and aging studies of addition-curing silicone rubbers by oxygen plasma," Eur. Polym. J., vol. 44, no. 7, pp. 2130–2139, 2008, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2008.04.012.

[15] M. A. Martínez, J. Abenojar y D. García-Pozuelo, "Effect of plasma treatment on coating adhesion and tensile strength in uncoated and coated rubber under aging," Materials, vol. 18, no. 2, p. 427, 2025, doi: 10.3390/ma18020427.

[16] C. Bai, Z. Gong, L. An, L. Qiang, J. Zhang, G. Yushkov et al., "Adhesion and friction performance of DLC/rubber: The influence of plasma pretreatment," Friction, vol. 9, no. 3, pp. 627–641, 2021, doi: 10.1007/s40544-020-0436-6.

[17] S. Ďurišová, M. Pajtášová, D. Ondrušová, R. Janík, Z. Mičicová, A. Dubec et al., "Effect of low-temperature plasma treatment on rubber properties," Polimery, vol. 69, no. 4, 2024, doi: 10.14314/polimery.2024.4.5.

[18] T. Junkar y A. Vesel, "Low-pressure non-equilibrium plasma technologies: Scientific background and technological challenges," Rev. Mod. Plasma Phys., 2025, doi: 10.1007/s41614-025-00201-x.

[19] L. T. Phan, S. M. Yoon y M.-W. Moon, "Plasma-based nanostructuring of polymers: A review," Polymers, vol. 9, no. 9, p. 417, 2017, doi: 10.3390/polym9090417.

[20] J. Lu, M. Mei y C. Huang, "Influence of silicon dioxide nanoparticles on hydrophobicity and transparency of polydimethylsiloxane coatings hybridized with silicon dioxide nanoparticles," Thin Solid Films, vol. 828, Art. no. 140800, 2025, doi: 10.1016/j.tsf.2025.140800.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

[21] K. Krawczyk, A. Jankowska, M. Młotek, B. Ulejczyk, T. Kobiela y K. Ławniczak-Jabłońska, "Surface modification of silicone by dielectric barrier discharge plasma," Materials, vol. 16, no. 8, p. 2973, 2023, doi: 10.3390/ma16082973.

[22] A. Tshikovhi, S. B. Mishra y A. K. Mishra, "Effect of silica content in a bio-polymeric blended nanocomposite for efficient adsorption of mercury in basic aqueous solution," Fibers Polym., vol. 26, pp. 521–535, 2025, doi: 10.1007/s12221-025-00854-y.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6695

Cambio en la producción de potencia empleando Na_2SO_4 en el cátodo de una celda de combustible microbiana

Change in power production using Na_2SO_4 in the cathode of a microbial fuel cell

Fuentes-Albarrán M. del C.[1]*, Alarcón-Hernández F.B.[1], Cornejo-Tapia C.P.[1], Sandoval-González A.[2]

[1]Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Avenida Nicolas Bravo s/n, Xalostoc CP 62725 Ayala, Morelos, México.
[2]Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C
Parque Tecnológico Querétaro SN, CP 76703 San Fandila, Querétaro, México.
*carmen.fuentes@uaem.mx

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

ABSTRACT

The power output of a microbial fuel cell was examined by varying the catholyte conditions. During acclimation, tap water served as catholyte, yielding a stable voltage of 0.55 ± 0.07 V after 8 days. Subsequently, Na_2SO_4 concentrations (0.3 and 0.5 M) were tested. Cell performance was evaluated using polarization and power curves. The lowest potential losses and highest power output occurred at 0.3 M Na_2SO_4. Peak power was 37.41 mW/m² with a current density of 101.94 mA/m². This result shows that conductivity affects the optimization of these systems for electricity production.
Keywords: Conductivity; internal resistance, power density; wastewater.

INTRODUCTION

Global energy demand is rising, and fossil fuels are used to meet these needs, driving emissions that contribute to climate change [1]. Renewable energies have gained significant momentum as clean energy resources [2]. Microbial fuel cells (MFCs) are an attractive alternative for electricity, converting organic waste into power [3,4]. Wastewater is an ideal fuel in these systems, offering both biological treatment and electricity production [5,6].

An MFC typically consists of an anodic and a cathodic chamber, separated by a proton exchange membrane [7,8]. At the anode, microorganisms degrade organic matter, generating electrons and protons. The protons pass through a membrane to the cathode, while the electrons flow to the cathode through an external electrical connection that usually includes a resistor. At the cathode, electrons, protons, and oxygen combine to form water [9,10]. However, despite its advantages, power output in MFCs remains low. A wide range of factors affect the performance and energy generation efficiency of this technology. These include electrode materials, microbial populations, pH, substrate concentrations, and conductivity [11,12].

EXPERIMENTAL METHODOLOGY

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

MFC Configuration. In the experiment, a type H MFC was used, consisting of two cylindrical glass compartments with a volume of 226.20 cm³ each (Figure 1). A Nafion® 117 proton exchange membrane was used to separate the two compartments, with gaskets placed between the junctions to prevent leaks. Carbon fiber electrodes (Fibre Glast Developments Corporation) were used. An uncatalyzed electrode was used at the anode, and a Pt/C (0.4 mg/cm²) catalyst was used at the cathode. Both electrodes had an area of 0.0018 m². The system was maintained at room temperature.

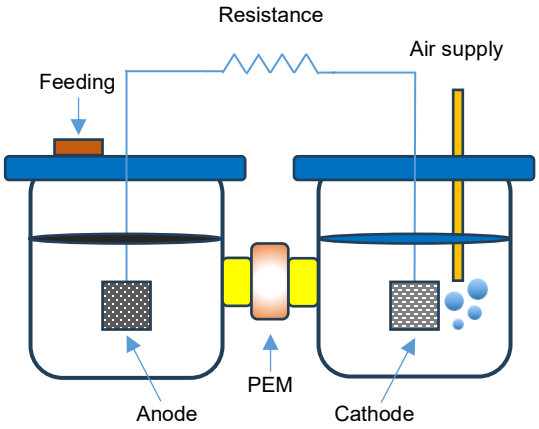


Figure 1. Experimental schematic of the microbial fuel cell.

Anolyte. A microbial consortium derived from domestic wastewater was used in the anolyte, employing acetate as a substrate (0.003 mol L^{-1}) and a buffer solution (NH_4Cl 0.31 gL^{-1}, KCl 0.31 gL^{-1}, $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ 3.32 g L^{-1}, $Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$ 10.32 gL^{-1}). This compartment was maintained under anaerobic conditions.

Catolyte. Tap water was used in the catholyte during the cell acclimation stage. Subsequently, once the system was stable, the conductivity was varied by changing Na_2SO_4 concentration (0.3 and 0.5 M). This compartment was maintained under aerobic conditions, supplied with air using an aquarium pump.

Data Acquisition and System Characterization. During the MFC acclimation phase, the open-circuit voltage (OCV) was monitored with a multimeter (Steren Professional Deluxe Multimeter with PC interface, Model: MUL-600). Once the cell reached a stable voltage, power output was evaluated by varying the system's conductivity. The MFC was characterized by using polarization and power curves, employing an external variable resistor (R_{Ext}) ranging from 5 to 10 kΩ. The resulting voltage was recorded for each resistance setting, and the current was determined using Ohm's Law:

$$I = E_{MFC}/R_{Ext}$$

Where: I is the current, E_{MFC} is the cell voltage, and R_{Ext} is the external resistance.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

The polarization curve was obtained by plotting voltage versus current, normalized to the anode area (m²). The power density curve was obtained by plotting power density versus current density, determining the power output (P_{MFC}) as follows:

$$P_{MFC} = {E^2_{MFC}}/{R_{Ext}}$$

Internal resistance. The internal resistance of the system was determined from the obtained bias curves, using the following expression:

$$E_{MFC} = E_b - IR_{Int}$$

Where: E_b is the extrapolation of the linear (intermediate) portion of a bias curve, I is the current, and R_{Int} is the internal resistance

RESULTS

The cell acclimation results, as well as the polarization and power graphs, are shown below.

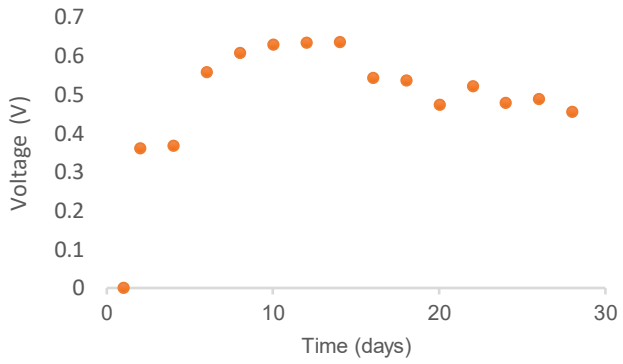


Figure 2. Acclimation stage of the MFC. Catholyte: Water.

Acclimation. Figure 2 shows the acclimation curve of the MFC. The system was in operation for 28 days. During the first 7 days of operation, the voltage gradually increased to ~0.57 V. Subsequently, the system stabilized at 0.55 ± 0.07 V, suggesting that the cell anode had been colonized by microorganisms.

Once the system reached stability, the MFC's power output performance was evaluated by varying the catholyte conductivity.

Characterization of the microbial fuel cell. Figure 3 shows the polarization curves obtained for the different concentrations of Na_2SO_4 used. As can be seen in the graph, the open-circuit voltage (OCV) using water as the catholyte was 0.62 V, while for 0.3 and 0.5 M it remained constant at ~0.8 V. When using water and 0.5 M Na_2SO_4 as the catholyte, voltage losses were almost linear at current densities below 40 mA/m², while at higher current densities, potential losses were slower.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

For a concentration of 0.3 M Na_2SO_4, lower potential losses were observed with a decreasing linear trend. Ohmic losses occur in the intermediate region of a polarization curve, and this is the region of interest in the design of an MFC. Reducing these potential losses is crucial for better system performance in electricity generation.

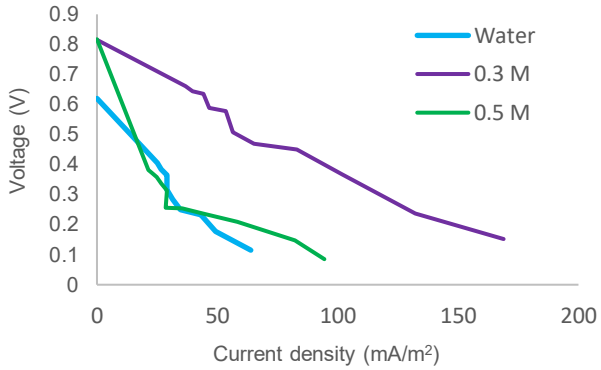


Figure 3. Polarization curves. Catholyte: Water, Na_2SO_4 (0.3 and 0.5 M).

Figure 4 shows the power output obtained in the MFC. Using water and 0.5 M Na_2SO_4 as the catholyte, peak power outputs of 10.05 and 12.16 mW/m² were generated, respectively. Power and current output increased when using 0.3 M Na_2SO_4, yielding a peak power output of 37.41 mW/m² with a current density of 101.94 mA/m².

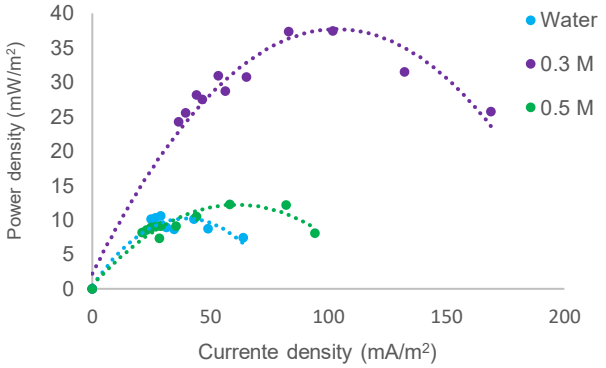


Figure 4. MFC Power Output, Catholyte: Water, Na_2SO_4 (0.3 and 0.5 M).

The concentration of Na_2SO_4 in the catholyte affects the system's conductivity and, therefore, the MFC's power output. This is an important factor to consider in the performance of these systems.

Internal Resistance. Table 1 shows the results obtained for the internal resistance of the MFC, as well as the maximum power densities obtained under each experimental condition.

Table 1. Internal resistance of the MFC and maximum power output obtained.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

Catolito	R_{int} (Ω)	Maximum power density (mW/m^2)
Water	3315	10.05
0.3 M Na_2SO_4	2111	37.41
0.5 M Na_2SO_4	1158	12.16

Adding Na_2SO_4 decreases the internal resistance. However, this behavior is not reflected in power output, as the maximum value was recorded at 0.3 M. Increasing the concentration to 0.5 M was detrimental to power output.

DISCUSSION

MFCs constitute an alternative to anaerobic digestion for obtaining energy from organic waste [13]. In these systems, microorganisms form a biofilm on the anode, transferring the electrons generated during their metabolism as they degrade organic matter. The time to microbial colonization depends on various factors, including the type of microbial culture, the system architecture, the substrate, and external resistance [14]. In this study, the colonization time was approximately 8 days, similar to that obtained in other studies. In one investigation using domestic wastewater from a brewery in MFC devices [15], a stable voltage of 0.362 ± 0.008 V was obtained after approximately 10 days of operation using a 1 kΩ resistor. Furthermore, in another study [16], different types of wastewater from the sugar, brewing, dairy, and leather industries were used. All MFCs reached their maximum voltage, between 1.0 and 1.2 V, after 8 days of operation. Wastewater contains a wide variety of microorganisms and can be efficiently used in an MFC for treatment while simultaneously producing electricity.

Conductivity is an operational factor that influences the efficiency of an MFC. Low proton conductivity restricts proton transport from the anode to the cathode, resulting in high internal resistance [17]. Internal resistance includes the electrode material's resistance, the electrolyte's conductivity, and the resistance of microbial biofilms. Reducing internal resistance can increase energy production [20].

In a previous study [18], the effect of different NaCl concentrations on the anode of an MFC was evaluated. The results showed that the highest power output was obtained at a NaCl concentration of 20 g L^{-1} (35 ± 2 Wm^{-3}), while increasing the concentration to 40 g L^{-1} reduced power output by approximately 50%. Furthermore, another study [19] analyzed the effect of conductivity on a sediment microbial fuel cell using different concentrations of NaCl and KCl. The authors observed that increasing the electrolyte conductivity improved the MFC's performance and reduced internal resistance, achieving maximum power densities of 32.76 mWm^{-2} for NaCl and 28.79 mWm^{-2} for KCl. These values are close to those obtained in this study using Na_2SO_4 as the catholyte in an MFC.

CONCLUSION

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

Microbial fuel cells (MFCs) represent a viable alternative for producing electricity from organic waste. Electrolyte conductivity is a factor that influences MFC performance and is related to the system's internal resistance. Hence, the importance of optimizing operating conditions to maximize MFC performance for practical applications.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc of Universidad Autónoma del Estado de Morelos, for the facilities provided to carry out this research. This work was funded by PRODEP [DSA/103.5/14/10703].

REFERENCES

[1] A. Raihan, M. S. A. Joarder, S. M. Rahman, A. M. Bari, M. Ridwan y T. Sarker, "Renewable energy resources for green development in Bangladesh: Perspectives, challenges, and opportunities," Innov. Green Dev., vol. 4, no. 5, Art. no. 100298, 2025, doi: 10.1016/j.igd.2025.100298.

[2] J. A. Afolabi, "Towards carbon neutrality in Europe: The role of technology exports, renewable energy consumption, and resource productivity," J. Environ. Manage., vol. 395, Art. no. 127862, 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.127862.

[3] J. Vilas Boas, V. B. Oliveira, M. Simões y A. M. F. R. Pinto, "Review on microbial fuel cells applications, developments and costs," J. Environ. Manage., vol. 307, Art. no. 114525, 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114525.

[4] D. Bose, R. Bhattacharya, M. Pillai, A. Ray, T. Kaur, S. Mondal y A. Mondal, "State-of-the-art review on sediment microbial fuel cells: Evolution, innovations, challenges, scalability, and policy implications for sustainable development," Water-Energy Nexus, vol. 9, 2025, doi: 10.1016/j.wen.2025.12.005.

[5] S. Sikder y M. M. Rahman, "Efficiency of microbial fuel cell in wastewater (municipal, textile, and tannery) treatment and bioelectricity production," Case Stud. Chem. Environ. Eng., vol. 8, Art. no. 100421, 2023, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100421.

[6] H. Du y Z. Shao, "Advances in anodes of microbial fuel cells for wastewater remediation and power generation," Mater. Rep. Energy, vol. 5, no. 4, Art. no. 100373, 2025, doi: 10.1016/j.matre.2025.100373.

[7] R. Suresh, S. Rajendran, P. S. Kumar, K. Dutta y D.-V. N. Vo, "RETRACTED: Current advances in microbial fuel cell technology toward removal of organic contaminants - A review," Chemosphere, vol. 287, Part 2, Art. no. 132186, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132186.

[8] N. Bazina, T. G. Ahmed, M. Almdaaf, S. Jibia y M. Sarker, "Power generation from wastewater using microbial fuel cells: A review," J. Biotechnol., vol. 374, pp. 17–30, 2023, doi: 10.1016/j.jbiotec.2023.07.006.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

[9] D. R. Lovley, "Bug juice: Harvesting electricity with microorganisms," Nat. Rev. Microbiol., vol. 4, pp. 497–508, 22006, doi 10.1038/nrmicro1442.

[10] K. Rabaey y W. Verstraete, "Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation," Trends Biotechnol., vol. 23, no. 6, pp. 291–298, 2005.

[11] S. S. Kumar, V. Kumar, R. Kumar, S. K. Malyan y A. Pugazhendhi, "Microbial fuel cells as a sustainable platform technology for bioenergy, biosensing, environmental monitoring, and other low power device applications," Fuel, vol. 255, Art. no. 115682, 2019, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115682.

[12] N. Hossain, M. S. Islam, M. K. Rahman, M. J. Talukder, M. R. Chowdhury, J. J. Mim, S. Islam, S. M. M. Rahman y M. M. R. Arup, "Microbial fuel cells: Bright sparks and lingering shadows: A comprehensive review," Sustain. Chem. Climate Action, vol. 7, Art. no. 100156, 2025, doi: 10.1016/j.scca.2025.100156.

[13] N. S. Malvankar, J. Lau, K. P. Nevin, A. E. Franks, M. T. Tuominen y D. R. Lovley, "Electrical conductivity in a mixed-species biofilm," Appl. Environ. Microbiol., vol. 78, no. 16, pp. 5967–5971, 2012.

[14] H. Du y Z. Shao, "Advances in anodes of microbial fuel cells for wastewater remediation and power generation," Mater. Rep. Energy, vol. 5, Art. no. 100373, 2025, doi: 10.1016/j.matre.2025.100373.

[15] Y. Feng, X. Wang, B. E. Logan y H. Lee, "Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells," Appl. Microbiol. Biotechnol., vol. 78, pp. 873–880, 2008, doi: 10.1007/s00253-008-1360-2.

[16] O. Sahu, "Assessment of sugarcane industry: Suitability for production, consumption, and utilization," Ann. Agrar. Sci., vol. 16, no. 4, pp. 389–395, 2018, doi: 10.1016/j.aasci.2018.08.001.

[17] B. Kanani, A. Zahedi, F. Abtahi y S. Abedi, "Exploring operational barriers in microbial fuel cells: Enhancing energy recovery from wastewater," Electrochem. Commun., vol. 180, Art. no. 108051, 2025, doi: 10.1016/j.elecom.2025.108051.

[18] O. Lefebvre, Z. Tan, S. Kharkwal y H. Y. Ng, "Effect of increasing anodic NaCl concentration on microbial fuel cell performance," Bioresour. Technol., vol. 112, pp. 336–340, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.02.048.

[19] Z. Najafgholi, M. Rahimnejad y G. Najafpour, "Effect of electrolyte conductivity and aeration on performance of sediment microbial fuel cell," J. Renew. Energy Environ., vol. 2, no. 1, pp. 43–48, 2015.

[20] N. Hossain, M. S. Islam, M. K. Rahman, M. J. Talukder, M. R. Chowdhury, J. J. Mim, S. Islam, S. M. M. Rahman y M. M. Rahman Arup, "Microbial fuel cells: Bright sparks and lingering shadows: A comprehensive review," Sustain. Chem. Climate Action, vol. 7, Art. no. 100156, 2025, doi: 10.1016/j.scca.2025.100156.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6693

Estudio exploratorio del contenido de etanol en la pulpa de la T*hevetia peruviana* (Pers.) K. Schum en Yucatán, México

Exploratory study of the ethanol content in the pulp of *Thevetia peruviana* (Pers.) K. Schum in Yucatán, México

Koh-Echeverría L.E.[1], Amado-Méndez K.[2], Díaz-Ballote, L.F.J.[2], Herrera-Zamora, D.M.[2]*

[1]Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, 97100.
[2]Cinvestav-Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Yucatán, México, 97310.
*Carretera Antigua a Progreso KM. 6, C.P. 97310, Mérida, Yucatán; México
*dallely.herrera@cinvestav.mx

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

RESUMEN

La búsqueda de fuentes de energía renovable ha impulsado el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica, que es una fuente renovable prometedora para producir biocombustibles como bioetanol y biodiésel, gracias a su abundancia, bajo costo y porque no compite con cultivos alimentarios. Entre especies poco estudiadas, la *Thevetia peruviana* destaca como una alternativa potencial para la producción de bioetanol a partir de residuos vegetales.

El objetivo de este estudio fue caracterizar la biomasa lignocelulósica del fruto de *Thevetia peruviana* y evaluar su viabilidad como fuente alternativa para la producción de bioetanol. Los frutos se sometieron a secado natural durante 10 días y posteriormente a secado en horno durante 8 h. El pericarpio y la semilla se separaron, trituraron y tamizaron de forma independiente, para después aplicar un pretratamiento hidrolítico con H_2SO_4 al 4%. La fermentación se realizó con *Saccharomyces cerevisiae* durante 14 días.

Los resultados mostraron que el fruto presenta un comportamiento térmico característico de materiales lignocelulósicos. El pericarpio molido (PM) presentó mayor contenido de hemicelulosa, mientras que la semilla molida (SM) mostró mayor proporción de celulosa y lignina. El análisis FTIR evidenció diferencias espectrales respecto al etanol puro, probablemente asociadas al carácter diluido del medio. Además, el análisis elemental reveló carbono de 71.74% en el pericarpio y 50.62% en la semilla. Estos resultados sugieren que el pericarpio constituye la fracción más favorable para la producción de bioetanol, aunque se requiere optimizar las condiciones del proceso para incrementar su rendimiento.

Palabras clave: Thevetia peruviana; Biocombustible; Bioetanol; Biomasa lignocelulósica; Celulosa.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

ABSTRACT

The search for renewable energy sources has driven the use of lignocellulosic biomass, a promising renewable source for producing biofuels such as bioethanol and biodiesel, thanks to its abundance, low cost, and the fact that it does not compete with food crops. Among the less studied species, *Thevetia peruviana* stands out as a potential alternative for bioethanol production from plant waste.

The objective of this study was to characterize the lignocellulosic biomass of *Thevetia peruviana* fruit and evaluate its viability as an alternative source for bioethanol production. The fruits were subjected to natural drying for 10 days and subsequently oven drying for 8 hours. The pericarp and seed were separated, crushed, and sieved independently, followed by a hydrolytic pretreatment with 4% H_2SO_4. Fermentation was carried out with *Saccharomyces cerevisiae* for 14 days.

The results showed that the fruit exhibits thermal behavior characteristic of lignocellulosic materials. The ground pericarp (PM) had a higher hemicellulose content, while the ground seed (SM) showed a higher proportion of cellulose and lignin. FTIR analysis revealed spectral differences compared to pure ethanol, likely due to the dilute nature of the medium. Furthermore, elemental analysis revealed carbon content of 71.74% in the pericarp and 50.62% in the seed. These results suggest that the pericarp is the most favorable fraction for bioethanol production, although process conditions need to be optimized to increase its yield.

Keywords: Thevetia peruviana; Biofuel; Bioethanol; Biomass lignocellulose; Cellulose.

INTRODUCCION

Una de las principales causas del incremento en la demanda energética mundial es el crecimiento poblacional y el acelerado proceso de industrialización. Actualmente, los combustibles fósiles continúan siendo la principal fuente de energía; sin embargo, su uso intensivo y la disminución progresiva de sus reservas representan una preocupación global [1, 2]. Desde el inicio de la Revolución Industrial, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) han aumentado de manera significativa, principalmente como consecuencia de la quema de combustibles fósiles [3, 4]. Esta tendencia ha intensificado los efectos del cambio climático, provocando alteraciones en los ecosistemas, incremento de la temperatura global y afectaciones al equilibrio ecológico y a la biodiversidad [5, 6].

La demanda mundial de energía, especialmente de combustibles líquidos, continúa en constante crecimiento. En 2007, el consumo global alcanzó cerca de 12 billones de toneladas equivalentes de petróleo (TEP), incrementándose a 13.3 billones de TEP en 2015 [7]. De manera similar, el consumo de petróleo pasó de aproximadamente 70 millones de barriles diarios en 1995 a más de 90 millones de barriles por día hacia finales de 2020 [8]. En México, esta dependencia es aún más evidente, ya que el 88.5% de la energía primaria proviene del petróleo y gas natural, mientras que únicamente el 7% corresponde a fuentes renovables [9].

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

Ante este panorama, resulta indispensable el desarrollo de alternativas energéticas sostenibles que permitan disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar sus impactos ambientales. En este contexto, la biomasa se posiciona como una fuente renovable con alto potencial, debido a su amplia disponibilidad, bajo costo y posibilidad de aprovechamiento local [10]. La biomasa se define como materia orgánica proveniente de árboles, plantas y residuos animales con capacidad de transformarse en energía. Puede originarse a partir de residuos agrícolas, como rastrojos, ramas, aserrín y corteza, así como de residuos urbanos, incluyendo aguas residuales y desechos orgánicos [11]. Su composición está constituida principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos fundamentales para la producción de biocombustibles [12].

La biomasa lignocelulósica se considera especialmente atractiva para la producción de biocombustibles de segunda generación, ya que no compite con cultivos destinados a la alimentación y permite valorizar residuos agrícolas y forestales [13 - 16]. Su contenido energético proviene de la energía solar captada por los vegetales mediante la fotosíntesis, la cual puede transformarse en energía útil a través de procesos termoquímicos, fisicoquímicos y biológicos [13, 14]. En particular, la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica se basa en la liberación de azúcares fermentables derivados de la celulosa y hemicelulosa, lo que convierte a este tipo de biomasa en una alternativa viable y sostenible para la transición energética [17].

Dentro de las especies vegetales con potencial energético poco explorado se encuentra *Thevetia peruviana* (Pers.) K. Schum, una especie nativa de regiones tropicales y subtropicales de América, distribuida en países como Brasil, México, diversas islas del Caribe y Bahamas, así como en regiones de Asia como India y Sri Lanka [18]. En México, se encuentra ampliamente distribuida en zonas tropicales y subtropicales de estados como Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Veracruz y Yucatán, entre otros [19, 20].

El aprovechamiento de plantas autóctonas como *Thevetia peruviana* representa una estrategia relevante para el desarrollo de biocombustibles sostenibles, ya que estas especies se encuentran naturalmente adaptadas a las condiciones edafoclimáticas locales, presentan menores requerimientos de agua, nutrientes e insumos agrícolas, y pueden desarrollarse en suelos marginales no aptos para cultivos alimentarios [21]. Esto reduce los costos de producción, minimiza la competencia por recursos agrícolas y fortalece la sostenibilidad del sistema energético. Además, al tratarse de una especie no comestible, no compromete la seguridad alimentaria de las comunidades locales. En Yucatán, *Thevetia peruviana* crece de forma espontánea en áreas urbanas, periurbanas y rurales, lo que facilita su recolección y aprovechamiento sin requerir establecimiento de cultivos intensivos [19 - 22]. Esta característica no solo favorece su disponibilidad como materia prima, sino que también contribuye a la valorización de recursos vegetales regionales y al impulso de esquemas de bioeconomía local.

Diversos estudios han reportado el potencial energético de *Thevetia peruviana* para la producción de biodiésel a partir del aceite contenido en su semilla [23, 24]. Sin embargo, existen escasos estu-

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

dios enfocados en el aprovechamiento de su biomasa lignocelulósica para la producción de bioetanol, a pesar de su abundancia y disponibilidad. La toxicidad de la especie ha limitado su uso en otras aplicaciones productivas, pero al mismo tiempo representa una ventaja al evitar su competencia con cadenas alimentarias. Esta situación evidencia una oportunidad de investigación orientada a la valorización integral de una biomasa no alimentaria y subutilizada, ampliando el espectro de materias primas empleadas en la producción de biocombustibles renovables.

En consecuencia, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de *Thevetia peruviana* como materia prima para la producción de bioetanol, mediante la caracterización de su biomasa lignocelulósica y el análisis de su comportamiento durante los procesos de hidrólisis y fermentación, con el fin de determinar su viabilidad como fuente alternativa de biocombustible.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Área de estudio. La presente investigación se realizó en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida ubicado en Carretera-Mérida - Progreso, Loma Bonita, Mérida, Yucatán. La caracterización de la biomasa lignocelulósica se realizó en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBIO) del Departamento de Física Aplicada.

2. Recolección. La recolección de frutos maduros de *T. peruviana* se realizó en tres localidades urbanas de Mérida Yucatán: (i) Paseo Verde, sobre la calle 26 cerca del Módulo de Servicio Peek Park de Los Paseos, (ii) Yaaxtal - Guardaparques De Mérida ubicado en la calle 132; (iii) el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav), Unidad Mérida. La selección de estos sitios respondió a su accesibilidad para la recolección de material vegetal (***Figura 1***).

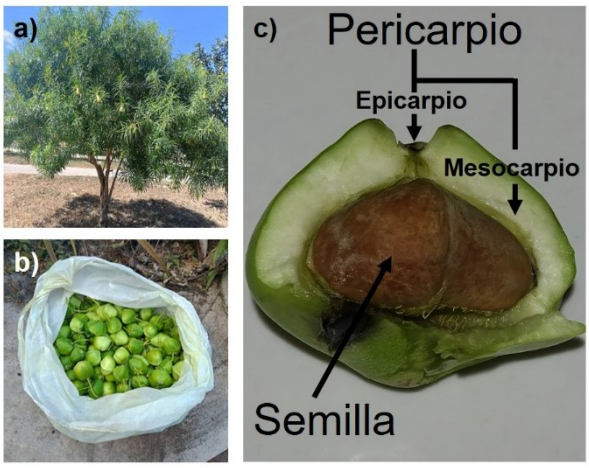


Figura 1. Recolección de Thevetia peruviana: a) árbol de Thevetia peruviana, b) frutos y c) corte de fruto mostrando el pericarpio y la semilla.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

3. Pretratamiento térmico. Se realizaron tres tipos de muestras de *T. peruviana*, la primera muestra (PT) consistió en recolectar frutos y someterlos a un secado al sol durante un período de 10 días, protegidos en una jaula para evitar la depredación. Durante este proceso, los frutos estuvieron expuestos a temperaturas ambientales fluctuantes entre 33°C y 36°C, con una humedad relativa de 70.8%. Posteriormente, tras la reducción natural del contenido de humedad, las muestras se sometieron a un secado a horno (TERLAB) a 80°C durante 10 horas con el objetivo de minimizar la humedad residual y optimizar el procedimiento mecánico posterior.

4. Pretratamiento mecánico y selección de partícula. El material vegetal fue procesado mediante molienda, con la finalidad de disminuir el tamaño de partícula y aumentar el área de contacto entre la biomasa y los reactivos, favoreciendo el proceso de hidrólisis. Tanto la semilla como el pericarpio fueron molidos de manera separada en un molinillo (modelo 81402, marca REDLEMON), y una malla de 74 µm para el pericarpio (PM), y de 707 µm para la semilla (SM) de acuerdo con el tamaño de partícula requerido para cada fracción. Las muestras obtenidas fueron destinadas a los análisis posteriores y al pretratamiento químico.

5. Pretratamiento químicos. Se preparó una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 4% v/v. Posteriormente, a 50 g de biomasa de SM y PM se añadió dicha solución y las mezclas se sometieron a calentamiento con agitación constante de 125 rpm, manteniéndose a 60°C durante 120 minutos. Seguidamente, se ajustó el pH de cada mezcla en intervalo de 3-4 mediante la adición de hidróxido de potasio (KOH), previo a la inoculación con *Saccharomyces cerevisae*. Finalmente, los sistemas se dejaron fermentar durante 14 días.

6. Análisis Termogravimétricos y de Calorimetría Diferencial de Barrido (TGA/DTG). Los análisis de termogravimetría se realizaron en un TGA (Discovery de TA Instruments), en presencia de oxígeno con un barrido de temperaturas de 30°C a 900°C a una velocidad de calentamiento continuo de 10°C/min.

7. Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). Los análisis se realizaron en un Espectrómetro Infrarrojo (630 Agilent Cary FT-IRb) con un barrido espectral desde los 500 a 4500 cm^{-1}.

8. Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía (EDS). Para la caracterización, se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (JEOL modelo JSM-7600F) y las muestras se les aplicó un recubrimiento con Au/Pd durante 40 segundos.

9. Resonancia Magnética Nuclear (RMN). Para la preparación de las muestras, a cada 500 µl se agregaron 200 ul de agua deuterada (D_2O), así como nicotinamida (referencia interna) y TSP (referencia de desplazamiento químico). Se sonicaron hasta obtener una disolución transparente y se transfirieron a tubos de 5 mm. El análisis de 1H-RMN se realizó con 64 scans (4 min).

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Análisis Termogravimétrico (TGA/DTG). El análisis termo-gavimétrico (TGA) permitió evaluar el comportamiento térmico de las muestras sometidas a pretratamiento físico y térmico. En el caso de la muestra SM (***Figura 2***) se identificaron tres rangos de temperatura de pérdida de biomasa. El primer rango de temperatura comprendido entre 30°C-150°C obtuvo una pérdida de masa de 0.56 mg (5.19%) con un máximo de degradación a 64.06°C, atribuible principalmente a la eliminación de humedad y compuestos volátiles de bajo peso molecular. Posteriormente, en el intervalo de 150°C-390°C se registró una pérdida de masa de 6.66 mg (62.04%) y tuvo un máximo de 336.23°C correspondiente a la degradación térmica de hemicelulosa y celulosa. Finalmente, en el último rango de temperatura de 390°C-550°C, en la cual se registró la pérdida de 3.52 mg (32.77%) con un máximo de temperatura de 448.62°C. asociada principalmente a la descomposición de la lignina y a procesos de carbonización residual.

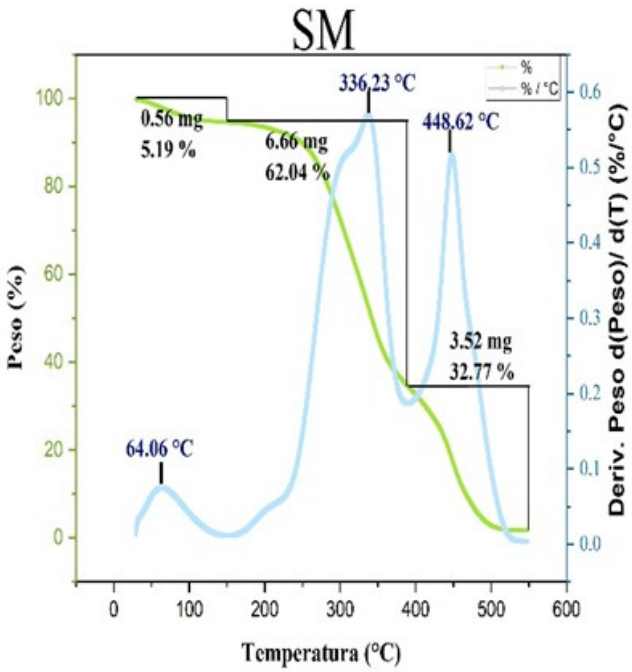


Figura 2. TGA/DTG de la semilla con su pretratamiento térmico del fruto de T. peruviana.

Por otra parte, la muestra PM (***Figura 3***) mostró un comportamiento térmico más complejo, identificándose cinco rangos de temperatura.

En el primer intervalo, de 30°C-130°C presentó una pérdida de masa de 0.67 mg (6.74%) y un máximo de 55.95°C atribuida a la eliminación de humedad adsorbida y compuestos volátiles. El segundo rango de temperatura de 130°C-230°C se registró una pérdida de 3.57 mg (35.88%) con un máximo de 184.79°C asociada principalmente a la degradación inicial de hemicelulosa y componentes amorfos de la biomasa. Para el tercer y cuarto rango (230°C-390°C, 390°C-470°C) [25, 26], las pérdidas de masa fueron de 3.00 mg (30.18%) con un máximo de 304.94°C y 1.70 mg

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

(17.06%) con máximo de 459.86°C, respectivamente. Estos eventos térmicos se asocian principalmente con la degradación progresiva de la celulosa y la descomposición de fracciones más resistentes de lignina. Finalmente, el quinto rango de temperatura tuvo una degradación de 1.00 mg (10.14%) y un máximo de 490.57°C atribuida a la descomposición de estructuras lignínicas altamente condensadas y a procesos de carbonización residual (biocarbón), qué tiene potencial para aplicaciones como combustible sólido, absorbente para la remediación ambiental, carbón activado para fines de purificación, catalizador en procesos químicos y como componente en celdas de combustible para la generación de energía [27, 28].

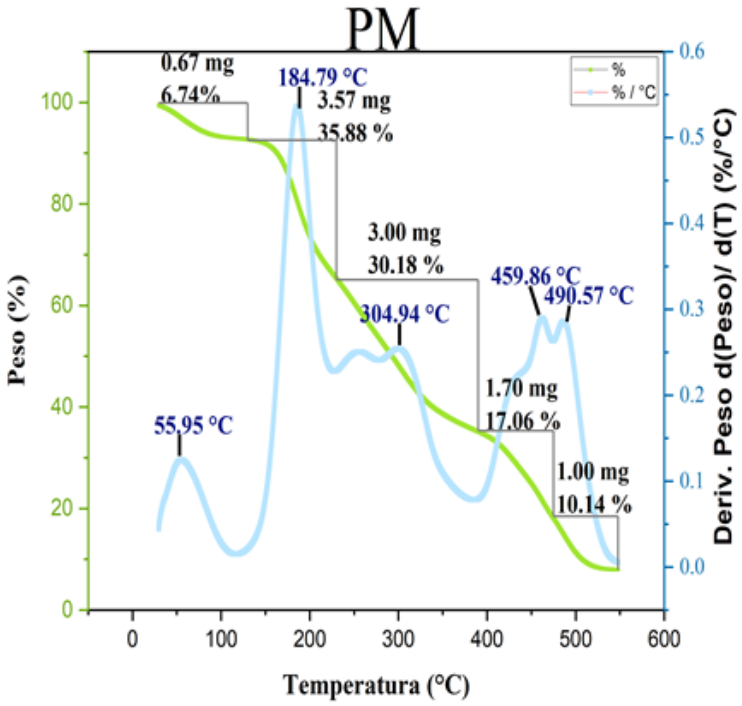


Figura 3. TGA/DTG del pericarpio con su pretratamiento térmico del fruto de T. peruviana.

En las curvas DTG, SM en el rango de temperatura de 30°C-150°C presentó una pérdida de humedad y degradación de compuestos volátiles, para el segundo rango de 150°C-390°C corresponde a la degradación de celulosa, demostrando mayor contenido que PM debido a la composición de la semilla, qué está formada mayormente por fibras de celulosa [29]. Por último, en el rango de temperatura de 390°C-550 se observa la degradación de la lignina. En comparación con la muestra de PM, la muestra de SM presentó mayor contenido de lignina, lo cual puede atribuirse a que la presencia de capas más densas en la semilla, responsables de su carácter leñoso y endurecido, y asociadas a una mayor concentración de sustancias cerosas, cutina y lignina [30]. Por otra parte, en la muestra PM se observó un comportamiento térmico similar. Para el primer rango de temperatura de 30°C-130°C se evidenció la pérdida de humedad y degradación de compuestos volátiles. No obstante, en el siguiente rango de temperatura (130°C-230°C) se reflejó la degradación de hemicelulosa, debido, lo cual concuerda con el mayor contenido relativo de este

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

polímero en el pericarpio en comparación a la semilla [31]. La degradación de celulosa ocurrió en el rango de temperatura de 230°C-390°C y la de la lignina en 390°C-470°C, evidenciando un menor contenido respecto a SM por su composición lignocelulósica [27, 32].

2. Análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). Los espectros FTIR de PM y SM observados en la ***Figura 4*** muestran diferencias en las composiciones lignocelulósicas. En el rango del número de onda alrededor de 1017 cm^{-1}, hay mayor estiramiento de C-O para el pericarpio. De manera similar, se registra una mayor transmitancia asociada a los enlaces C-O-C y C-H (1247 cm^{-1} y 1371 cm^{-1}), respectivamente, lo que indica mayor contenido lignocelulósico y de otros componentes orgánicos en comparación con la muestra SM [33, 34]. La banda correspondiente al enlace C-C (1596 cm^{-1}) presenta una menor intensidad en la muestra SM, lo que sugiere una menor contribución de estructuras aromáticas [35]. Asimismo, la presencia del enlace C-H observado en 2917 cm^{-1} es menos pronunciado en SM [36]. Finalmente, las bandas anchas de O-H (3297 cm^{-1}) presentes en ambas muestras confirman la abundancia de grupos hidroxilo, sin embargo, la mayor intensidad observada en la muestra PM sugiere un mayor contenido de polisacáridos y grupos funcionales hidroxilados [37; 38]. Dichos resultados, difieren de los reportados por Tiwari, *et al.* (2023) [27], quienes observaron estiramientos similares, sin embargo, para el pericarpio se reportó un estiramiento y anchura de banda mayor del grupo O-H (3289 cm^{-1}). La diferencia de resultados probablemente se debe a la diferencia de tamaño de partícula empleado en el presente estudio, así como las variaciones en las propiedades fisicoquímicas de las muestras.

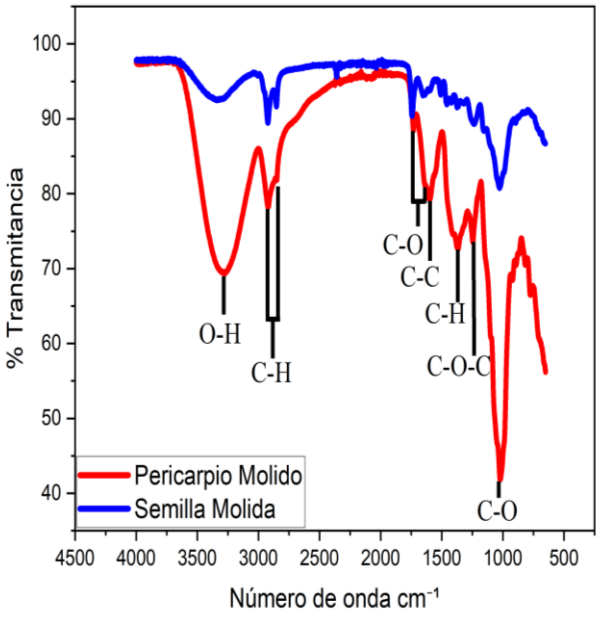


Figura 4. Espectro FTIR del pericarpio y semilla molida del fruto de Thevetia peruviana.

Las gráficas de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) corresponden a las muestras del pericarpio destilado (***Figura 5***) y semilla destilada (***Figura 6***), comparados con el

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

espectro de etanol puro. En el espectro de etanol se identificaron bandas pertenecientes a los grupos O-H, C-H y C-O. El estiramiento del grupo O-H se observó alrededor de 3366 cm^{-1}, mientras que los estiramientos de C-H se localizaron a 2890 cm^{-1} y 2980 cm^{-1} y C-O (1048 cm^{-1}, 1092 cm^{-1}, 1229 cm^{-1}, 1384 cm^{-1} y 1706 cm^{-1}) indicando la presencia de etanol [39-41].

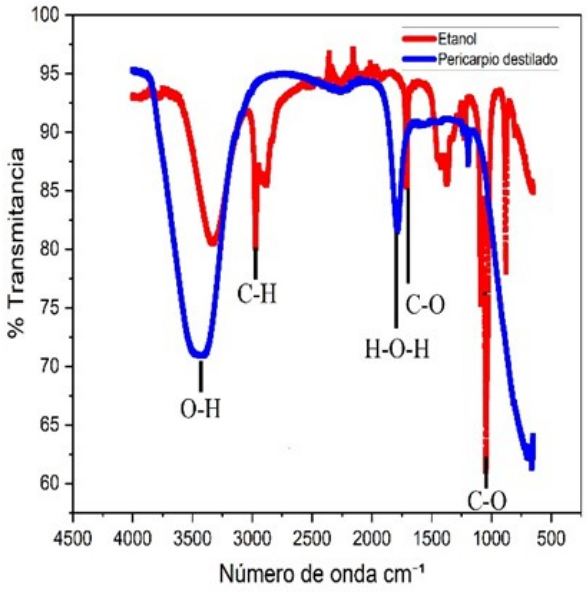


Figura 5. Espectro FTIR del pericarpio destilado de Thevetia peruviana.

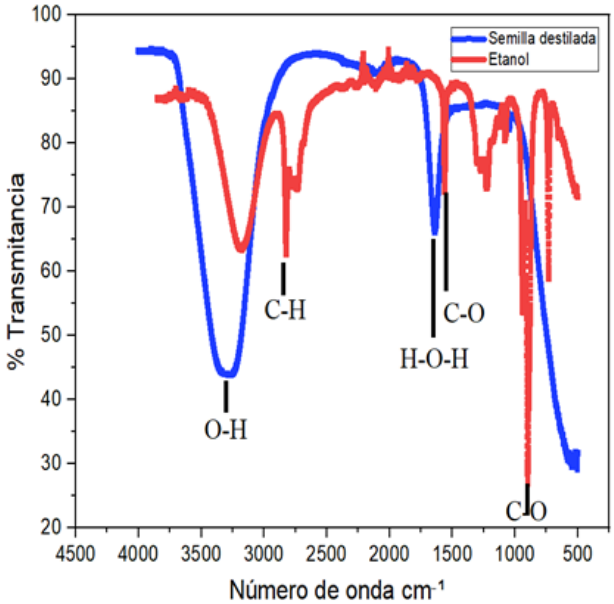


Figura 6. Espectro FTIR de la semilla destilada de Thevetia peruviana.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

En contraste los espectros obtenidos para las muestras PM y SM mostraron bandas características del estiramiento H–O–H alrededor de 1650 y 1637 cm^{-1}, respectivamente, así como bandas anchas asociadas al estiramiento O–H en 3292 y 3288 cm^{-1}. Estas señales presentan una mayor similitud con el espectro infrarrojo del agua que con el del etanol, lo que sugiere la presencia predominante de agua residual y/o una baja concentración de etanol en las muestras analizadas [42, 43]. Con ello, el espectro observado en SM Y PM indican que no presentan un patrón predominante de etanol, lo que sugiere que el contenido presente se encuentra por debajo del límite de detección de la técnica FTIR o de igual manera, se deba a la evaporación de etanol en el medio, obteniendo como resultado una detección errónea [44]. De igual forma, debe considerarse que las muestras analizadas se encuentran en una solución diluida en agua, lo que influye directamente en la forma e intensidad de las bandas espectrales, generando diferencias respecto al espectro del etanol puro y explicando la variación observada en los espectros FTIR.

3. Microscopía Electrónica de Barrido y Análisis Elemental. Las micrografías obtenidas para PM observadas en la ***Figura 7*** revelan una morfología fibrosa, compacta y densa. En contraste, las micrografías de SM que se muestran en la ***Figura 8*** evidencian una morfología granulada con bordes irregulares.

Las diferencias morfológicas observadas entre las muestras se atribuyen principalmente a la composición lignocelulósica de cada fracción. En el caso de la SM la mayor proporción de lignina y celulosa, evidenciada en el análisis termogravimétrico descrito anteriormente, confiere a la estructura un carácter leñoso y rígido, lo cual concuerda con la formación de morfologías granulares asociadas a la alta resistencia estructural del material [45-47].

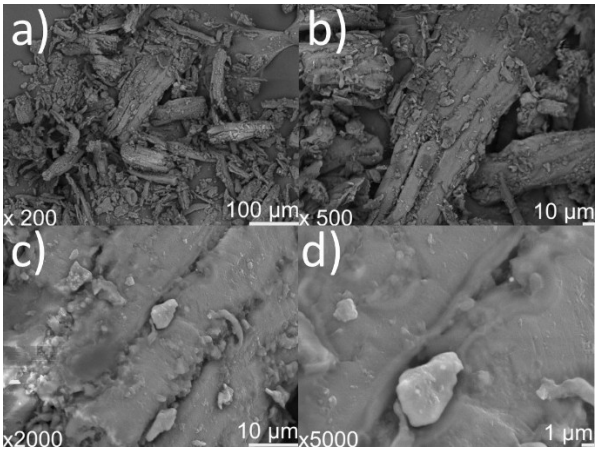


Figura 7. Micrografías SEM del pericarpio con magnificación: (a) 200x (b) 500x (c) 2000x y (d) 5000x.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

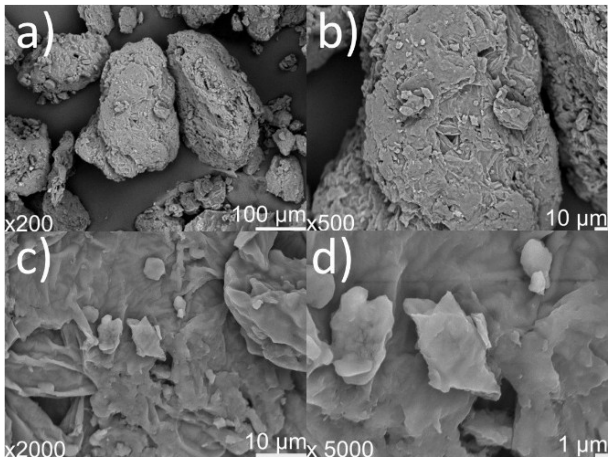


Figura 8. Micrografías SEM de la semilla molida en aumentos de (a) 200X (b) 500x (c) 2000x y (d) 5000x.

Por otra parte, la morfología fibrosa del pericarpio se relaciona con su mayor contenido relativo de hemicelulosa tal como se puede observar en los análisis termogravimétricos descritos anteriormente, lo que favorece una estructura menos rígida y más fibrilar [10].

Como consecuencia, al presentar menor contenido de celulosa en su composición, el pericarpio exhibe una menor resistencia a la degradación, lo que facilita mayor liberación de azúcares durante la hidrólisis [48-50].

El análisis elemental de SM (***Tabla 1***), muestra que la composición corresponde a un 50.62% de carbono y 44.67% de oxígeno, con proporciones menores de los elementos encontrados en la biomasa del material lignocelulósico: sodio (1.33%), cloro (0.85%) y potasio (2.54%).

Tabla 1: Análisis elemental de SM de T. peruviana.

Elemento	**Peso%**	**Atómico%**
C K	50.62	58.92
O K	44.67	39.03
Na K	1.33	0.81
Cl K	0.85	0.33
K K	2.54	0.91
Total	**100**	

Por otra parte, la muestra PM (***Tabla 2***) mostró una composición dominada por carbono con un 71.74% y oxígeno 26.38%. En menor proporción se encuentran los elementos que componen el material lignocelulósico: magnesio (0.34%), fósforo (0.81%), potasio (0.44%) y calcio (0.29%).

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

Tabla 2: Análisis elemental de PM de T. peruviana.

Elemento	Peso%	Atómico%
C K	71.74	77.77
O K	26.38	21.47
Mg K	0.34	0.18
P K	0.81	0.34
K K	0.44	0.15
Ca K	0.29	0.09
Total	**100**	

En el análisis elemental para las muestras SM (***Tabla 1***) y PM (***Tabla 2***) se observó un predominio de carbono y oxígeno. Al comparar estos resultados con el estudio de Ronquillo-Ponce, M. (2021) [51], quienes reportaron contenidos promedio de carbono de 44.57% en maíz, 39.02% en cebada y 36.21% en trigo, se evidencia que el pericarpio de *T. peruviana* presenta una mayor concentración de carbono. En conjunto, estos resultados indican que PM constituye un candidato prometedor para su aprovechamiento en procesos de producción de bioetanol [52].

4. Resonancia Magnética Nuclear (RMN) . El análisis RNM del pericarpio destilado (***Figura 9***) y semilla destilada (***Figura 10)*** reveló la presencia de tres señales características. El pico C, ubicado en 0.98 ppm para el pericarpio y 1.01 ppm para la semilla, la cual corresponde al grupo metilo CH_3 con un patrón de triplete. El pico B presentó un patrón de cuarteto en ambas muestras, con desplazamientos químicos de 3.43 ppm para el pericarpio y 3.47 ppm para la semilla, atribuibles al grupo metileno CH_2. Finalmente, el pico A, observado con una señal singular a 4.62 ppm para el percarpio y 4.63 ppm para la semilla, se asocia al protón hidroxilo (O-H).

Los resultados concuerdan con lo reportado en la literatura [53, 54], donde se describen valores de desplazamiento químico similares para procesos de fermentación en vinos y zumos utilizando *Saccharomyces cerevisiae*, así como en el aprovechamiento de frutas y vegetales para la producción de biocombustibles. Estos hallazgos confirman la presencia de etanol en las muestras analizadas. Asimismo, se observó una mayor intensidad relativa de las señales asociadas al etanol en el pericarpio destilado en comparación con la semilla destilada, lo que refuerza que el pericarpio de *T. peruviana* es más adecuado como materia prima para la producción de biocombustibles.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

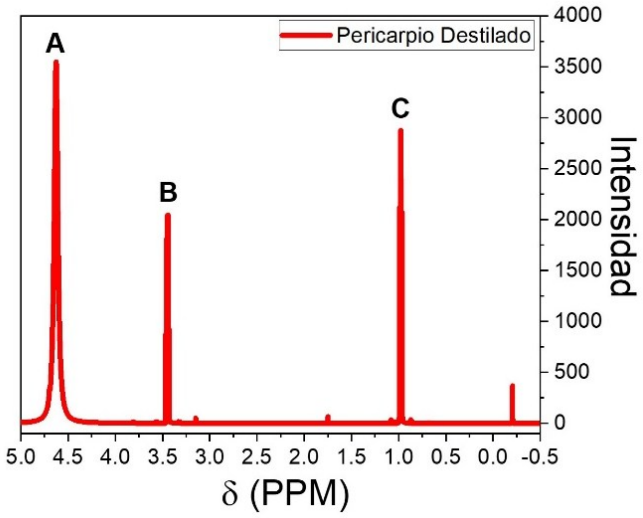


Figura 9. Resonancia Magnética Nuclear (RNM) del pericarpio destilado.

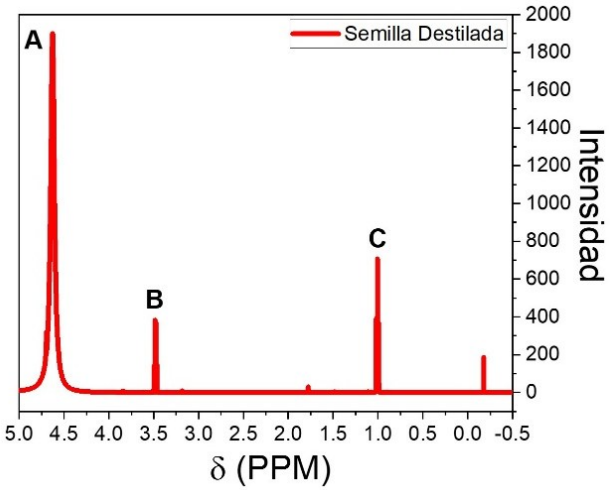


Figura 10. Resonancia Magnética Nuclear (RMN) de la semilla destilada.

CONCLUSIÓN

El presente estudio permitió evaluar el potencial de *Thevetia peruviana* como materia prima para la producción de bioetanol mediante la caracterización fisicoquímica de su biomasa lignocelulósica y el análisis de su comportamiento durante los procesos de hidrólisis y fermentación. Los resultados demostraron que tanto el pericarpio como la semilla presentan propiedades compatibles con el aprovechamiento energético; sin embargo, el pericarpio mostró mayores ventajas para la producción de bioetanol debido a su mayor contenido relativo de hemicelulosa, mayor accesibilidad estructural, menor resistencia a la degradación y un contenido de carbono superior (71.74%), factores que favorecen la liberación de azúcares fermentables y su posterior conversión a etanol.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

La confirmación de señales asociadas a etanol mediante RMN, así como el comportamiento térmico característico de materiales lignocelulósicos observado en TGA/DTG, respaldan la viabilidad de *Thevetia peruviana* como fuente alternativa de biomasa para la obtención de biocombustibles. Aunque los análisis FTIR de los destilados mostraron limitaciones en la detección directa de etanol debido a la dilución del medio y posibles pérdidas por evaporación, los resultados integrales permiten establecer una base sólida para su aprovechamiento energético.

A diferencia de investigaciones previas enfocadas principalmente en la producción de biodiésel a partir del aceite de la semilla, este trabajo aporta evidencia novedosa sobre el potencial de la fracción lignocelulósica del fruto para la producción de bioetanol, ampliando el conocimiento sobre la valorización integral de esta especie no alimentaria y tóxica. Esto representa una contribución original al campo de los biocombustibles de segunda generación, particularmente en el uso de plantas autóctonas adaptadas a condiciones edafoclimáticas locales.

El aprovechamiento de *Thevetia peruviana* no solo diversifica las materias primas disponibles para la producción de bioetanol, sino que también fortalece estrategias de bioeconomía regional, al promover el uso sostenible de biomasa no convencional abundante en Yucatán. Por ello, esta investigación abre nuevas perspectivas para el desarrollo de procesos optimizados de conversión y para futuras aplicaciones de esta especie en tecnologías de energía renovable.

AGRADECIMIENTOS

Al Cinvestav-Unidad Mérida y al Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBIO) del Departamento de Física Aplicada por las caracterizaciones SEM-EDS, TGA/DTG y RMN. D.M. Herrera-Zamora agradecen a CONAHCYT y SECIHTI por la beca posdoctoral 8472580, en el marco del programa “Estancias posdoctorales por México”.

REFERENCIAS

[1] J. Arismendi, A. Avendaño, J. Parra y D. Rodríguez, “Aprovechamiento de aceites vegetales usados para la obtención de biodiésel de segunda generación: una revisión,” ConBRepro, vol. XI, no. I, pp. 1–10, 2021. [En línea]. Disponible: https://aprepro.org.br/conbrepro/2021/anais/arquivos/09272021_220941_61526cf9343f5.pdf

[2] M. A. Álvarez Amparán y L. Cedeño-Caero, “Análisis y relevancia de los procesos catalíticos para la remoción de azufre en los combustibles fósiles,” Mundo Nano, vol. XIV, no. 26, pp. 1–21, 2021, doi: 10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69633.

[3] N. Patel y D. Mehta, “El efecto asimétrico de la industrialización, el desarrollo financiero y la globalización en las emisiones de CO_2 en la India,” Int. J. Thermofluids, vol. XX, no. 1, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100397.

[4] J. Roca Jusmet, “La política climática y los combustibles fósiles: Una perspectiva desde la oferta,” Rev. Econ. Crítica, vol. XXXIV, pp. 9–25, 2022.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

[5] S. S. Hassan, G. A. Williams y A. K. Jaiswal, "Avanzando hacia la segunda generación de biorrefinerías lignocelulósicas en la UE: impulsores, desafíos y oportunidades," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 101, pp. 590–599, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.041.

[6] H. Gutiérrez Aceves, S. M. Mercado Ibarra, O. Chávez López y J. L. Razo-Arévalo, "Procesos de construcción, emisión de dióxido de carbono y resultados socioeconómicos durante la pandemia del COVID-19 en México," Telos, vol. XXXIII, no. 2, pp. 485–502, 2021, doi: 10.36390/telos232.17.

[7] S. Guevara, J. Alvarado, M. Arroyo, R. Escutia y J. Rico, "Hidrodesoxigenación catalítica: uso de compuestos derivados de biomasa para la generación de biocombustibles," Rev. Multidisciplinaria, vol. VII, no. 1, pp. 9536–9548, 2023, doi: 10.37811/cl_rcm. v7i1.5076.

[8] M. Estrada Maya y B. Weber, "Biogás y bioetanol a partir de bagazo de agave sometido a explosión de vapor e hidrólisis enzimática," Ing. Investig. Tecnol., vol. XXIII, no. 2, pp. 1–10, 2022, doi: 10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.009.

[9] J . Ventura Ríos, M. Santiago Ortega, M. Maldonado Peralta, P. Álvarez Vázquez, R. Maldonado Peralta, I. Barrera Martínez y C. Wilson Darcía, "Biomasa de Urochloa humidicola como materia prima para pproducir biocombustible" Ecosist. Recur. Agropec., vol. 44, no. 4, pp. 1–12, 2021, doi: 10.19136/era. a11nIV.4073.

[10] P. Basera, S. Chakraborty y N. Sharma,"Biomasa lignocelulósica: información sobre la hidrólisis enzimática, factores influyentes y viabilidad económica," Discov. Sustain., vol. 5, Art. no. 311, pp. 1–16, 2024, doi: 10.1007/s43621-024-00543-5.

[11] K. Ulpo, D. Espín y P. Palmay, "Co-pirólisis de la mezcla de biomasa lignocelulósica y residuos plásticos," Perfiles, vol. 1, no. 29, pp. 69–77, 2023, doi: 10.47187/perf. v1i29.207.

[12] R. C. Rodrigues, B. G. Rodrigues, E. V. Canettieri, E. A. Martinez, F. Palladino, A. Wisniewski Jr. y D. Rodrigues Jr., "Comprehensive approach of methods for microstructural analysis and analytical tools in lignocellulosic biomass assessment: A review," Bioresour. Technol., vol. 348, Art. no. 126627, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126627.

[13] J. Serrano, W. Mejía, J. Ortiz, A. Sánchez y S. Zalamea, "Determinación del potencial de generación eléctrica a partir de biomasa en el Ecuador," Rev. Fac. Cienc. Quím., vol. 17, pp. 41–61, 2021.

[14] V. Inyang, O. T. Laseinde y G. Kanakana, "Técnicas y aplicaciones de fuentes de biomasa lignocelulósica como combustibles para el transporte y otros bioproductos," Int. J. Low-Carbon Technol., vol. 17, pp. 900–909, 2022, doi: 10.1093/ijlct/ctac068.

[15] K. Kucharska, E. Słupek, H. Cieśliński y M. Kaminski, "Advantageous conditions of saccharification of lignocellulosic biomass for biofuels generation via fermentation processes," Chem. Pap., vol. 74, pp. 1199–1209, 2020, doi: 10.1007/s11696-019-00960-1.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

[16] S. Soltanian, M. Aghbashlo, F. Almasi, H. Hosseinzadeh-Bandbafha, A. S. Nizami, Y. S. Ok y M. Tabatabaei, "A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels," Energy Convers. Manag., vol. 212, Art. no. 112792, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112792.

[17] K. S. Baig, "Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: Causes, mechanism and influencing factors," Bioresour. Bioprocess., vol. 7, no. 21, pp. 1–19, 2020, doi: 10.1186/s40643-020-00310-0.

[18] S. D. Langford y P. J. Boor, "Oleander toxicity: An examination of human and animal toxic exposures," Toxicology, vol. 109, no. 1, pp. 1–13, 1996, doi: 10.1016/0300-483X(95)03296-R.

[19] T. Torres, Evaluación de la eficacia de la semilla de Thevetia peruviana sobre la reducción de peso en ratas hembra Wistar obesas, tesis de licenciatura, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México, 2010. [En línea]. Disponible: http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/4216/1/AT14996.pdf

[20] L. Alvarado Cárdenas, L. Lozada Pérez, C. Islas Hernández, E. Cortez, K. Maya Mandujano y M. Chávez Hernández, "Apocináceas de ayer y hoy. Conocimiento histórico y reevaluación de la diversidad y distribución de Apocynaceae en México," Bot. Sci., vol. 98, no. 2, pp. 393–416, 2020, doi: 10.17129/botsci.2525.

[21] V. S. Larnaudie, M. D. Ferrari y C. Lareo, "El pasto varilla como biomasa alternativa para la producción de etanol en una biorrefinería: Perspectivas sobre tecnología, economía y sostenibilidad ambiental," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 158, Art. no. 112115, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112115.

[22] V. S. Chauhan, A. Mazumder y S. Chandel, "Thevetia peruviana: Its phytochemistry, traditional and medicinal uses, and pharmacological activities," Int. J. Drug Deliv. Technol., vol. 13, no. 4, pp. 1657–1663, 2023, doi: 10.25258/IJDDT.13.4.81.

[23] T. F. Adepoju, B. E. Olatunbosun, O. M. Olatunji y M. A. Ibeh, "Brette Pearl Spar Marble (BPSM): A potential recoverable catalyst as a renewable source of biodiesel from Thevetia peruviana seed oil for the benefit of sustainable development in West Africa," Energy Sustain. Soc., vol. 8, no. 23, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1186/s13705-018-0164-1.

[24] L. Domínguez Pérez, D. Castañeda Valbuena, A. Rosales Quintero, J. A. Santiz Gómez, V. Zimmermann, J. J. Virgen Ortiz, S. Galindo Ramírez, R. Fernandez-Lafuente, R. C. Rodríguez y V. Tacias Pascacio, "Evaluation of aqueous enzymatic extraction for obtaining oil from Thevetia peruviana seeds," Catalysts, vol. 15, no. 7, p. 628, 2025, doi: 10.3390/catal15070628.

[25] R. K. Mishra y K. Mohanty, "Kinetic analysis and pyrolysis behavior of low-value waste lignocellulosic biomass for its bioenergy potential using thermogravimetric analyzer," Mater. Sci. Energy Technol., vol. 4, pp. 136–147, 2021, doi: 10.1016/j.mset.2021.03.003.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

[26] J. M. Camargo Lopez, V. Palermo, M. H. Brijaldo, J. J. Martinez ZZambrano yG. P. Rommanelli, "Catalizadores preparados a partir de biomasa: Aplicación en la obtención de intermediarios de aditivos de biocombustibles," Cienc. Aplicadas, vol. 4, no. 1, pp. 1–4, 2023. [En línea]. Disponible: https://revistas.unlp.edu.ar/CienciasAplicadas/issue/view/986

[27] A. K. Tiwari, N. Prasad, A. Kapoor, A. K. Arya y D. B. Pal, "Sustainable valorization of Cascabela thevetia fruit peel and seed waste biomass: Characterization and thermo-kinetic analysis," Biomass Convers. Biorefin., vol. 15, pp. 26435–26447, 2023, doi: 10.1007/s13399-023-05066-z.

[28] R. Lugo, H. Caamal Velázquez y J. Cano Sosa, XX Años de Biotecnología en el Sureste Mexicano y su aporte a la Sociedad. Guadalajara, México: Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería, Delegación Sur-Sureste, 2022. [En línea]. Disponible: https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_63766a9437564.pdf

[29] A. Maceda, M. Soto Hernández, C. B. Peña Valdivia, C. Trejo y T. Terrazas, "Lignina: composición, síntesis y evolución," Madera Bosques, vol. 27, no. 2, pp. 1–16, 2022, doi: 10.21829/myb.2021.2722137.

[30] Y. G. Gillij, A. A. Galussi y P. Perisse, "Características morfoanatómicas y químicas del tegumento seminal de Desmodium incanum (Fabaceae, Desmodieae) y su asociación con la dormición," Lilloa, vol. 60, no. 2, pp. 241–257, 2023, doi: 10.30550/j.lil/1852.

[31] N. Gouda, R. K. Singh, R. K. Patel y A. K. Panda, "Fast pyrolysis of Kaner (Thevetia peruviana) seed to fuel and chemicals," Int. J. Appl. Anal. Chem., vol. 1, no. 1, pp. 7–20, 2015.

[32] W. Rivera, X. Velasco y C. A. Rincón, "Evaluación por TGA y FTIR de los cambios de composición producidos por la tostión en granos de café," Rev. Colomb. Fís., vol. 45, no. 3, pp. 205–208, 2013.

[33] R. Raudhatussyarifah, W. B. Sediawan, M. M. Azis y I. Hartati, "Microcrystalline cellulose production by acid hydrolysis of hydrotropic rice straw pulp," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 963, no. 1, Art. no. 012055, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/963/1/012055.

[34] I. Iliyin, H. Purwaningsih y T. T. Irawadi, "Isolation and characterization of cellulose from banana stems using microwave heating," J. Kimia Valensi, vol. 6, no. 2, pp. 169–176, 2020, doi: 10.15408/jkv. v6i2.15962.

[35] J. K. Ogunjobi, A. I. Adewale y S. A. Adeyemi, "Cellulose nanocrystals from Siam weed: Synthesis and physicochemical characterization," Heliyon, vol. 9, Art. no. e13104, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e13104.

[36] D. Q. Viet y V. D. Son, "Study on characteristics of acacia wood by FTIR and thermogravimetric analysis," Vietnam J. Chem., vol. 55, no. 2, pp. 259–264, 2017, doi: 10.15625/2525-2321.2017-00456.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

[37] F. Carrillo, X. Colom, J. J. Suñol y J. Saurina, "Structural FTIR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres," Eur. Polym. J., vol. 40, no. 9, pp. 2229–2234, 2004, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2004.05.003.

[38] S. Ge, X. Chen, D. Li, Z. Liu, H. Ouyang, W. Peng y Z. Zhang, "Hemicellulose structural changes during steam pretreatment and biodegradation of Lentinus edodes," Arab. J. Chem., vol. 11, no. 6, pp. 771–781, 2018, doi: 10.1016/j.arabjc.2017.12.022.

[39] S. U. Ilyas, R. Pendyala y N. Marneni, "Stability and agglomeration of alumina nanoparticles in ethanol-water mixtures," Procedia Eng., vol. 148, pp. 290–297, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.616.

[40] T. Flores-Reyes y L. Ponce, Solución láser para un problema espinoso: la ablación láser como método para remover las espinas del fruto de tuna. España: EAE LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co., 2011.

[41] K. Quintero, L. López y L. De Lima, "Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier- reflectancia total atenuada (FTIR/ATR) aplicada a la caracterización de crudos y su relación con la gravedad API," Rev. Fac. Ing. Univ. Cent. Venez., vol. 29, no. 2, pp. 93–102, 2014.

[42] S. Abdul, M. Abu, F. Adam y P. Jamal, "Structures and hydrogen bonding recognition of mefenamic acid form I crystals in mefenamic acid/ethanol solution," Int. J. Chem. Eng. Appl., vol. 4, no. 3, pp. 124–128, 2013, doi: 10.7763/IJCEA. 2013.V4.277.

[43] R. Marlina, R. Y. Arundina, E. A. Togatorop, S. A. Saifulloh, Ismadi, D. Purnomo, I. Budiman, Y. Darma y Subyakto, Proceedings of the 1st International Conference of Lignocellulose. Singapore: Springer Nature, Green Energy and Technology, 2025.

[44] P. Mondragón Cortez, Principios y aplicaciones de la espectroscopía de infrarrojo en el análisis de alimentos y bebidas. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), 2020.

[45] P. Lu y Y. Hsieh, "Preparation and properties of cellulose nanocrystals: rods, spheres, and network," Carbohydr. Polym., vol. 82, no. 2, pp. 329–336, 2010, doi: 10.1016/j.carbpol.2010.04.073.

[46] K. Bauddh, B. Singh y J. Korstad, Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants. Singapore: Springer Nature Singapore, 2017.

[47] J. Wu, Y. Dong, H. Zhang, J. Liu, S. Renneckar y J. Saddler, "Reduced cellulose accessibility slows down enzyme-mediated hydrolysis of cellulose," Bioresour. Technol., vol. 371, Art. no. 128647, 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2023.128647.

[48] B. L. Browning, "Crystallinity and accessibility," en Methods of Wood Chemistry, New York, NY, USA, 1967, pp. 499–518.

[49] C. Siol, D. Thrän y S. Majer, "Aprovechamiento de biomasas residuales de la agricultura y la silvicultura: Diferentes enfoques para establecer límites sistémicos en evaluaciones ambientales y económicas del ciclo de vida," Palmas, vol. 44, no. 1, pp. 65–82, 2023.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

[50] I. A. Ángeles Zamora, J. G. Pérez Flores, L. García Curiel, L. A. Portillo Torres, E. Contreras López y E. Pérez Escalante, "Uso de la cal para la extracción de arabinoxilanos a partir de la biomasa lignocelulósica: hacia una biorrefinería sostenible y economía circular," Horizonte Acad., vol. 5, no. 1, pp. 1–31, 2025, doi: 10.70208/3007. 8245.v5.n1.63.

[51] M. E. Ronquillo Ponce, Obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática a partir de biomasa residual agrícola procedente de maíz blanco, trigo y cebada con fines de biorrefinería, tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible: https://dspace.espoch.edu.ec

[52] A. Alvarez Castillo, R. Salgado Delgado, E. García Hernández, M. M. Domínguez Domínguez, J. M. Granados Baeza, A. Aguirre Cruz, R. Carmona García, A. Morales Cepeda, P. J. Herrera Franco, A. Licea Claverie y A. M. Mendoza-Martínez, "Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos," Rev. Iberoam. Polím., vol. 13, no. 4, pp. 140–150, 2012.

[53] J. E. Herbet Pucheta, J. D. Lozada Ramírez, A. E. Ortega-Regules, L. R. Hernández y C. Anaya de Parrodi, "Metabolómica por resonancia magnética nuclear con eco de gradiente de campo pulsado doble y espectroscopia de supresión de disolventes automatizada para matrices de datos multivariantes aplicadas al análisis discriminante de vinos y zumos," Molecules, vol. 26, no. 14, pp. 1–23, 2021, doi: 10.3390/molecules26144146.

[54] K. S. Tanamachi, N. C. Alvarado Ahedo, J. R. Gárate Ruiz, M. P. Restrepo Elorza, G. M. González Guerra, F. I. Gómez Castro y S. Hernández Castro, "Revaloración de residuos de fruta y verdura para la producción de biocombustibles," Jóvenes en la Ciencia, vol. 26, pp. 1–14, 2022.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6690

Determinación de carbohidratos por HPLC: comparación de detectores UV-Vis *vs* índice de refracción

Determination of carbohydrates by HPLC: comparison of UV-Vis detectors *vs* refractive index

Fernández-Orozco I.V.[1], Grijalva-Haro M.I.[2], Madrigal-Diaz S.C.[1], Ojeda-Morales M.E.[1], Díaz-Reyes C.C.[1], García-López S.[1], Juárez-Zirate S.J.[3]*

[1]Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Carretera Cunduacán-Jalpa Km. 1, Colonia La Esmeralda CP 86690 Cunduacán Tabasco México
[2]Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.
Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas 46, CP 83340 Hermosillo Sonora México
[3]Tecnológico Nacional de México
*Av. Tecnológico 1500, Colonia Lomas de Santiaguito CP 58120 Morelia Michoacán México
*zirate.juarez@gmail.com

Artículo Científico
Publicado: 15 diciembre 2026

RESUMEN

El análisis de carbohidratos mediante cromatografía líquida representa un desafío debido a su alta polaridad y ausencia de cromóforos intensos, lo que limita su detección directa. En este estudio se comparó el desempeño de dos detectores convencionales acoplados a cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en modo de interacción hidrofílica (HILIC) para la cuantificación de fructosa, glucosa y sacarosa. Se evaluó la detección ultravioleta-visible (UV-Vis) a 192 nm y la detección mediante índice de refracción (DIR), utilizando una bebida gaseosa comercial como matriz real. Ambos sistemas presentaron linealidad ($R^2 > 0.998$) y repetibilidad (CV < 3%). Los límites de detección (LoD) y cuantificación (LoQ) fueron de 0.234-0.310 y 0.709-0.941 mg·mL^{-1} para UV-Vis, y de 0.140-0.189 y 0.424-0.571 mg·mL^{-1} para DIR, respectivamente. En la muestra, ambos detectores proporcionaron resultados comparables para fructosa (2.25 *vs.* 2.15 g·100 mL^{-1}) y sacarosa (6.81 *vs.* 6.71 g·100 mL^{-1}); sin embargo, la detección UV-Vis sobreestimó la glucosa (3.7 *vs.* 2.1 g·100 mL^{-1}) debido a una interferencia atribuida a la matriz. Las discrepancias observadas estuvieron asociadas a limitaciones de selectividad frente a la matriz y no a la linealidad del método analítico. En conjunto, los resultados indican que la detección UV-Vis directa a 192 nm constituye una alternativa viable para la cuantificación de carbohidratos mediante HILIC cuando se dispone de adecuada resolución cromatográfica y la matriz presenta baja susceptibilidad a interferencias.

Palabras clave: Comparación de detectores; cuantificación de carbohidratos; cromatografía líquida de interacción hidrofílica; índice de refracción; UV-Vis.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

ABSTRACT

Carbohydrate analysis by liquid chromatography remains challenging because of their high polarity and the absence of strong chromophores, which limits their direct detection. In this study, the performance of two conventional detectors coupled to high-performance liquid chromatography (HPLC) operating in hydrophilic interaction liquid chromatography (HILIC) mode was compared for the quantification of fructose, glucose, and sucrose. Ultraviolet-visible (UV-Vis) detection at 192 nm and refractive index detection (RID) were evaluated using a commercial carbonated soft drink as a real sample matrix. Both detection systems exhibited linearity ($R^2 > 0.998$) and repeatability (CV < 3%). The limits of detection (LoD) and quantification (LoQ) were 0.234 - 0.310 and 0.709 - 0.941 mg·mL^{-1} for UV-Vis, and 0.140-0.189 and 0.424-0.571 mg·mL^{-1} for RID, respectively. In the sample, both detectors provided comparable results for fructose (2.25 *vs.* 2.15 g·100 mL^{-1}) and sucrose (6.81 *vs.* 6.71 g·100 mL^{-1}); however, UV-Vis detection overestimated glucose (3.7 *vs.* 2.1 g·100 mL^{-1}) because of matrix-related interference. The observed discrepancies were attributed to matrix-related selectivity limitations rather than to any lack of linearity in the analytical method. Overall, the results indicate that direct UV-Vis detection at 192 nm constitutes a viable alternative for carbohydrate quantification by HILIC when adequate chromatographic resolution is achieved and the sample matrix exhibits low susceptibility to interference.

Keywords: Detector comparison; carbohydrate quantification; hydrophilic interaction liquid chromatography; refractive index detection; UV-Vis.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los carbohidratos es esencial, ya que, además de constituir elementos estructurales y de reserva energética, regulan procesos biológicos clave, como la señalización celular y la modulación de rutas metabólicas [1]. En nutrición y ciencia de los alimentos, determinan propiedades funcionales, digestibilidad y calidad sensorial de productos alimentarios [2]. En farmacología, participan en la formulación de excipientes, fármacos y sistemas de liberación controlada [3]. Asimismo, en materiales de construcción, su adición como aditivo puede influir en procesos de nucleación y morfología de carbonatos y mejorar ciertas propiedades de sistemas cementantes [4, 5]. Debido a su presencia en sistemas biológicos, alimentarios, farmacéuticos y de materiales, la caracterización de los carbohidratos resulta fundamental.

Los carbohidratos son compuestos hidrosolubles, polares y no volátiles que, en su mayoría, carecen de cromóforos y pueden presentar múltiples estereoisómeros, lo que dificulta su separación y detección analítica [6, 7]. Entre las alternativas para la identificación y cuantificación de carbohidratos, la cromatografía HPLC destaca por su capacidad para separar compuestos altamente polares presentes en mezclas complejas [6-9]. Para el análisis de carbohidratos por HPLC se dispone de detectores especializados como el detector de aerosol cargado (Charged Aerosol Detector, CAD), el detector de dispersión de luz por evaporación (Evaporative Light Scattering

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

Detector, ELSD) y el detector amperométrico pulsado (Pulsed Amperometric Detector, PAD), que permiten detectar carbohidratos sin necesidad de cromóforos [9-11]. Aunque CAD y PAD ofrecen elevada sensibilidad y un amplio rango de aplicación, sus requerimientos instrumentales y condiciones específicas de operación pueden limitar su implementación en laboratorios de análisis rutinario [10-12].

En este contexto, el detector de índice de refracción (DIR) constituye una alternativa convencional para la detección de carbohidratos, cuya simplicidad operativa y disponibilidad en plataformas HPLC rutinarias contrastan con los requerimientos instrumentales de detectores especializados. El DIR detecta compuestos cuyo índice de refracción difiere del de la fase móvil; no obstante, su respuesta es susceptible a variaciones de temperatura y presenta limitaciones de sensibilidad e incompatibilidad con elución en gradiente, aspectos que restringen su aplicación en muestras complejas [7,10-12]. Otro detector ampliamente disponible en los laboratorios de HPLC es el UV-Vis. Sin embargo, la detección directa de carbohidratos mediante este sistema se ve limitada por la ausencia de cromóforos en la mayoría de estos compuestos. Por ello, su análisis suele requerir procedimientos de derivatización que modifican químicamente los grupos hidroxilo o carbonilo para incorporar grupos cromofóricos y mejorar la respuesta espectral [6-8].

Con el propósito de prescindir de etapas de derivatización, desde los primeros desarrollos cromatográficos se ha explorado la detección directa de carbohidratos mediante UV-Vis en la región del UV profundo (190-210 nm), donde estos compuestos presentan una absorción débil atribuida a transiciones electrónicas de alta energía asociadas a los átomos de oxígeno presentes en su estructura [13]. En años recientes, esta estrategia también ha sido empleada en combinación con cromatografía líquida de interacción hidrofílica (Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography, HILIC), una técnica particularmente adecuada para la separación de carbohidratos y otros compuestos altamente polares [7, 14]. Aunque esta aproximación simplifica la preparación de la muestra, su aplicación puede verse limitada por la baja absortividad molar de los carbohidratos en esta región espectral y por posibles interferencias provenientes de la fase móvil o de la matriz [6, 15].

Aunque se ha descrito el uso de la detección UV-Vis y de índice de refracción para el análisis de carbohidratos, los estudios que comparan sistemáticamente ambos sistemas bajo condiciones cromatográficas equivalentes y en matrices reales siguen siendo limitados [7, 15, 16]. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo comparar el desempeño de los detectores UV-Vis (192 nm) y DIR acoplados a HPLC en modo HILIC para la cuantificación de fructosa, glucosa y sacarosa en una bebida gaseosa comercial. La evaluación incluyó parámetros de desempeño analítico, como sensibilidad, selectividad, linealidad, precisión y desempeño cuantitativo, con el fin de aportar criterios objetivos para seleccionar el sistema de detección más adecuado en laboratorios que emplean plataformas convencionales de HPLC.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

METODOLOGÍA

Preparación de soluciones estándar. Se prepararon mezclas de fructosa, glucosa y sacarosa de grado analítico (Sigma-Aldrich) para determinar los tiempos de retención y evaluar la respuesta de los detectores DIR y UV-Vis. La solución madre se obtuvo disolviendo 0.2 g de cada estándar en 5 mL de agua destilada filtrada (0.22 µm), obteniendo una concentración de 40 $mg \cdot mL^{-1}$. Posteriormente, se prepararon soluciones de trabajo de 4, 20 y 28 $mg \cdot mL^{-1}$ mediante dilución de 100, 500 y 700 µL de la solución madre hasta un volumen final de 1 mL.

Curvas de calibración. Para evaluar la linealidad del método con los detectores UV-Vis y DIR, se construyeron curvas de calibración para los tres carbohidratos analizados, empleando las soluciones previamente preparadas (4, 20, 28 y 40 $mg \cdot mL^{-1}$).

Límites de Detección y Cuantificación. Los límites de detección (LoD) y cuantificación (LoQ) se estimaron de acuerdo con la guía *International Council for Harmonisation* (ICH) Q2(R1), empleando la desviación estándar de la respuesta correspondiente al nivel de concentración más bajo evaluado (4 $mg \cdot mL^{-1}$) como estimación de σ y la pendiente de la curva de calibración (S), mediante las expresiones $LoD = 3.3\sigma/S$ y $LoQ = 10\sigma/S$ [17, 18].

Condiciones Cromatográficas. El sistema HPLC consistió en una bomba ProStar modelo 220 (Varian, USA) acoplada a dos detectores conectados en serie: un detector UV-Vis 9050 (Varian, USA) operado a una longitud de onda de 192 nm y un detector de índice de refracción ProStar 350 (Varian, USA), con una sensibilidad de 5.2×10^{-4} RIU (Refractive Index Units).

Columna y Condiciones de Separación. La separación se realizó en una columna aminopropil Microsorb NH_2 (100 mm × 4.6 mm ID) rellena con partículas de 3 µm y poros de 100 Å. El inyector fue una válvula Rheodyne 7125 con loop de 10 µL. La temperatura de operación se mantuvo en 25 °C.

Fase Móvil. Se empleó una solución acetonitrilo:agua (80:20), filtrada (0.22 µm) y desgasificada al vacío, la cual se bombeó isocráticamente a un flujo de 1.0 $mL \cdot min^{-1}$, en condiciones características del modo HILIC.

Preparación de la Muestra. Se analizó una bebida gaseosa comercial tipo cola (Coca-Cola®, The Coca-Cola Company, USA) previamente desgasificada por agitación y filtrada a 0.22 µm.

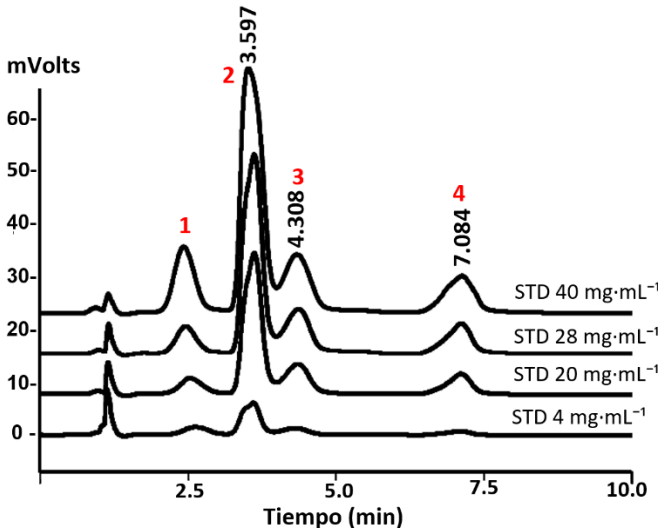
Análisis de Datos. La sensibilidad instrumental se estimó a partir de la pendiente de las curvas de calibración. La linealidad se evaluó mediante regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2). La precisión se expresó como coeficiente de variación (CV%), la normalidad se verificó con la prueba de Shapiro-Wilk y la comparación de medias mediante t pareada con un nivel de confianza de $\alpha = 0.05$. Se empleó el software estadístico Minitab versión 17. Para asegurar la repetibilidad instrumental y validez estadística de resultados se realizaron cinco inyecciones repetidas (n = 5) tanto de la solución estándar como de la muestra.

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cromatogramas correspondientes a la mezcla de estándares en distintas concentraciones se presentan en la **Figura 1** para el detector UV-Vis y en la **Figura 2** para el DIR. Los tiempos de retención obtenidos para fructosa, glucosa y sacarosa fueron de 3.597, 4.308 y 7.084 min en UV-Vis, y de 3.749, 4.445 y 7.214 min en DIR, respectivamente. Las ligeras variaciones en los tiempos de retención pueden asociarse a la conexión en serie de los detectores, la cual introduce un desfase mínimo en el registro de la señal. En los cromatogramas UV-Vis se observó un pico adicional a ~2.5 min, ausente en el DIR, cuya identidad no pudo establecerse; por lo tanto, se reportó como pico desconocido. Asimismo, las respuestas registradas con el detector UV-Vis fueron menores que las obtenidas con el DIR para glucosa y fructosa, particularmente a la concentración más baja evaluada (4 mg·mL^{-1}).

La **Tabla 1** muestra las áreas cromatográficas promedio obtenidas de los estándares de fructosa, glucosa y sacarosa a concentraciones de 4, 20, 28 y 40 mg·mL^{-1} con los detectores UV-Vis y DIR. En ambos sistemas se evidenció un incremento progresivo del área conforme aumentó la concentración de los carbohidratos, confirmando la relación directa entre la concentración del analito y la respuesta instrumental. El detector DIR registró áreas cromatográficas considerablemente mayores para los tres carbohidratos evaluados en todo el intervalo analizado, siendo más evidente para glucosa y sacarosa. Los coeficientes de variación inferiores al 3% indicaron una adecuada repetibilidad instrumental, por lo que las diferencias observadas entre detectores pueden atribuirse principalmente a su respuesta analítica y no a variaciones experimentales.



Pico: 1 = Desconocido, 2 = Fructosa, 3 = Glucosa, 4 = Sacarosa.

Figura 1. Cromatograma de la mezcla de estándares por UV-Vis.Columna Microsorb-NH_2; fase móvil acetonitrilo:agua (80:20)/1.0 mL·min^{-1}.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

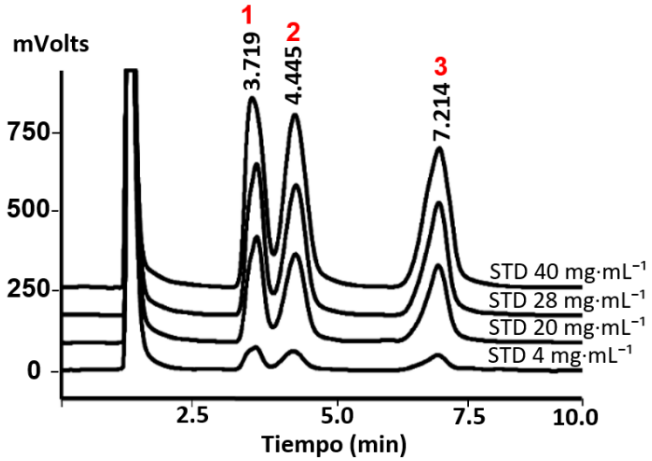


Figura 2. Cromatograma de la mezcla de estándares por DIR. Columna Microsorb-NH_2; fase móvil acetonitrilo: agua (80:20)/1.0 mL·min^{-1}.

Tabla 1. Áreas de respuesta cromatográfica de estándares de carbohidratos obtenidas con detector UV-Vis y DIR

Estándar mg·mL^{-1}	UV-Vis			DIR		
	Fructosa	Glucosa	Sacarosa	Fructosa	Glucosa	Sacarosa
	Área (DE)	Área (DE)	Área (DE)	Área (DE)	Área (DE)	Área (DE)
4	129722 (2041)	35452 (820)	23362 (534)	1551278 (21013)	1785297 (18058)	1383960 (15865)
20	571932 (15756)	163126 (2029)	115393 (1978)	7068646 (46799)	7948198 (101310)	6938518 (88991)
28	831901 (3354)	236055 (6254)	171751 (1349)	10471541 (117752)	12044655 (152130)	10430042 (82036)
40	1149868 (28014)	323794 (4556)	236240 (6622)	14710914 (149742)	17060226 (184651)	14585864 (130160)

Nota. Valores expresados como media del área (n = 5); DE = desviación estándar; coeficiente de variación < 3 %.

Las curvas de calibración para fructosa, glucosa y sacarosa obtenidas con los detectores UV-Vis (**Figura 3a**) y DIR (**Figura 3b**) mostraron una adecuada relación lineal entre la concentración y el área cromatográfica. Los parámetros de linealidad (pendiente, intercepto y R^2), junto con los límites de detección (LoD) y cuantificación (LoQ), se resumen en la **Tabla 2**. Ambos sistemas mostraron coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.998, confirmando la linealidad del método en el intervalo de 4-40 mg·mL^{-1} para los tres sacáridos.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

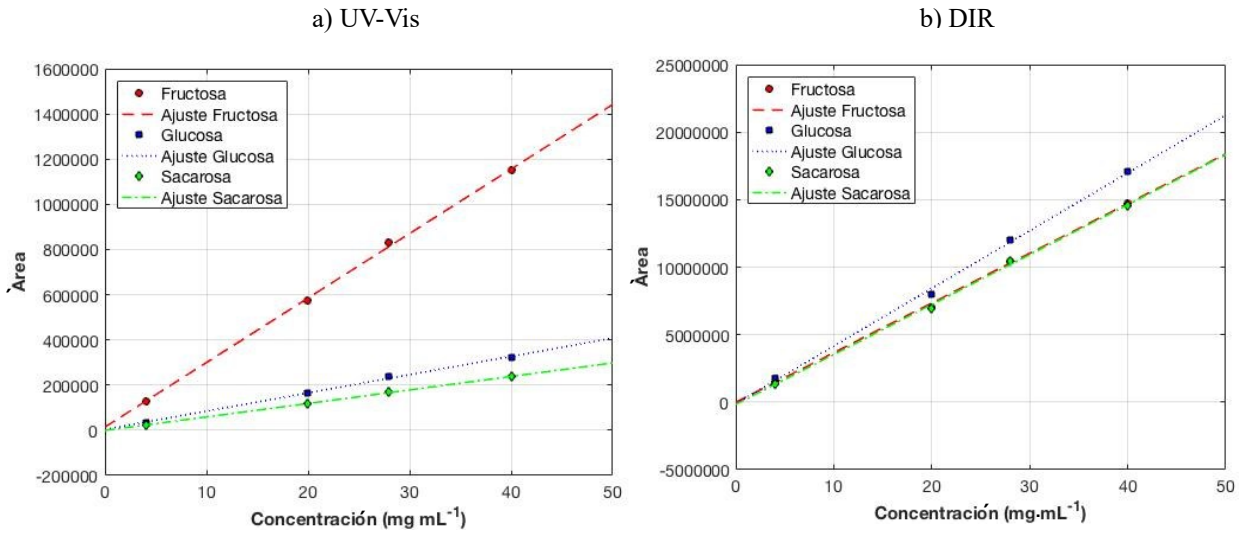


Figura 3. Curvas de calibración de fructosa, glucosa y sacarosa obtenidas mediante detección UV-Vis y DIR

Tabla 2. Parámetros de linealidad y límites de detección y cuantificación de fructosa, glucosa y sacarosa en UV-Vis y DIR.

Compuesto	Detector	Pendiente	Intercepto	R^2	Intervalo lineal mg·mL⁻¹	LoD mg·mL⁻¹	LoQ mg·mL⁻¹
Fructosa	UV-Vis	28785	7044.9	0.9993	4-40	0.234	0.709
Glucosa	UV-Vis	8138.2	1943.2	0.9992	4-40	0.310	0.941
Sacarosa	UV-Vis	5960.8	-329.72	0.9989	4-40	0.295	0.895
Fructosa	DIR	367823	-7473.1	0.9992	4-40	0.189	0.571
Glucosa	DIR	425522	-61937	0.9984	4-40	0.140	0.424
Sacarosa	DIR	367012	-85344	0.9989	4-40	0.143	0.432

Nota. Los valores de LoD y LoQ se calcularon empleando la desviación estándar en el nivel de 4 mg·mL⁻¹ y la pendiente de la curva de calibración, conforme a la guía ICH Q2(R1) [16, 17].

Los valores de LoD oscilaron entre 0.140-0.310 mg·mL⁻¹, mientras que los de LoQ se situaron entre 0.424-0.941 mg·mL⁻¹. En todos los casos, el detector DIR presentó menores límites de detección y cuantificación que el UV-Vis, lo que indica una mayor sensibilidad instrumental para la detección y cuantificación de bajas concentraciones de los carbohidratos evaluados. Además, los valores de LoD y LoQ obtenidos indicaron que ambos métodos permitieron detectar y cuantificar concentraciones inferiores al límite inferior del intervalo de calibración (4 mg·mL⁻¹), lo que evidencia que el intervalo seleccionado fue adecuado para la cuantificación de los carbohidratos evaluados.

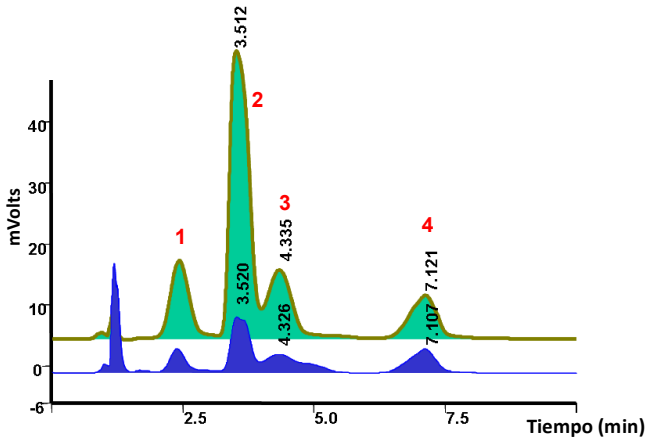
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

Las pendientes obtenidas con el DIR fueron 12.8, 52.3 y 61.6 veces mayores que las registradas con UV-Vis para fructosa, glucosa y sacarosa, respectivamente, lo que indica una mayor respuesta del detector frente a estos analitos. La diferencia relativa entre pendientes sugiere que la respuesta de ambos detectores depende del carbohidrato analizado, lo cual coincide parcialmente con lo reportado por Jalaludin e Kim [16], quienes observaron diferencias entre ambos sistemas según el tipo de azúcar evaluado, con una ventaja del detector de índice de refracción particularmente para disacáridos bajo sus condiciones experimentales. En el presente estudio, la mayor respuesta del UV-Vis para fructosa respecto a glucosa y sacarosa sugiere diferencias en la absortividad aparente de estos carbohidratos a 192 nm, asociadas con sus características estructurales. En contraste, el DIR basa su respuesta en los cambios del índice de refracción de la fase móvil asociados con la presencia del analito, lo que es coherente con las mayores pendientes de calibración obtenidas bajo las condiciones evaluadas [6, 15].

Esta diferencia en la respuesta instrumental coincide con estudios comparativos previos. Serafim et al. [15] validaron un método de HPLC con detección simultánea UV-Vis a λ = 210 nm y RID, obteniendo una elevada linealidad ($R^2 > 0.995$) y menores límites de detección mediante RID, de acuerdo con lo observado en este estudio. Autores como Chen et al. [6] señalan que la escasa respuesta de los carbohidratos en la región UV se debe a la ausencia de cromóforos fuertes en su estructura, mientras que la detección mediante índice de refracción constituye una alternativa más adecuada para este tipo de analitos. En conjunto, la correspondencia entre los parámetros obtenidos y los reportados previamente respalda la confiabilidad del método desarrollado y la mayor sensibilidad analítica del detector DIR para la cuantificación de fructosa, glucosa y sacarosa.

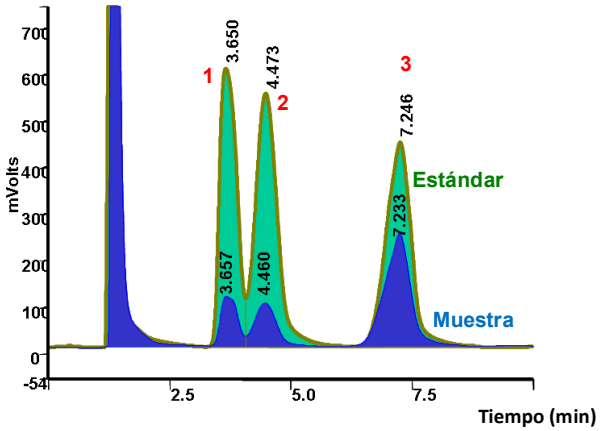
Respecto al análisis de la muestra, las señales obtenidas inicialmente excedieron el rango lineal de la curva de calibración, por lo que fue necesario realizar una dilución 1:2 con agua destilada. Los tiempos de retención registrados con el detector UV-Vis para fructosa, glucosa y sacarosa fueron 3.512, 4.335 y 7.121 min, respectivamente (**Figura 4**), mientras que en el DIR los tiempos obtenidos fueron 3.650, 4.473 y 7.246 min (**Figura 5**). Las ligeras diferencias observadas entre ambos detectores fueron consistentes con su configuración en serie. Adicionalmente, en el cromatograma UV-Vis se observó una señal parcialmente superpuesta en la región de elución de la glucosa. El orden de elución observado (fructosa, glucosa y sacarosa) fue consistente con el comportamiento esperado para separaciones HILIC en columnas aminopropilo [19], donde la retención depende de las interacciones hidrofílicas entre los grupos funcionales de los carbohidratos y la fase estacionaria [20, 21]. Si bien los tiempos de retención pueden variar entre sistemas cromatográficos, la secuencia de elución coincidió con la reportada previamente para carbohidratos analizados bajo condiciones HILIC.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687



Pico: 1 = Desconocido, 2 =Fructosa, 3 =Glucosa, 4 =Sacarosa.

Figura 4. Cromatograma de la muestra por detector UV-Vis/HPLC
Nota: Columna Microsorb-NH_2; fase móvil acetonitrilo:agua (80:20)/1.0 mL·min^{-1}.



Pico: 1 =Fructosa, 2 =Glucosa, 3 =Sacarosa.

Figura 5. Cromatograma de la muestra por DIR/HPLC.
Nota: Columna Microsorb-NH_2; fase móvil acetonitrilo:agua (80:20)/1.0 mL·min^{-1}.

En la **Tabla 3** se presentan las áreas cromatográficas promedio y las concentraciones de fructosa, glucosa y sacarosa determinadas en la bebida mediante ambos sistemas de detección. A partir de la suma de estos azúcares se estimó el contenido total de azúcares de la muestra, el cual se comparó con el valor declarado en el etiquetado nutricional de la bebida. Los resultados mostraron concordancia entre detectores sin diferencia significativa para fructosa (UV-Vis 2.25 g·100 mL^{-1} *vs* DIR 2.15 g·100 mL^{-1}; $p = 0.055$) y sacarosa (UV-Vis 6.81 g·100 mL^{-1} *vs.* DIR 6.71 g·100 mL^{-1}; $p = 0.172$). Esta concordancia se observó a pesar de que las áreas registradas por el DIR fueron

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

considerablemente mayores que las obtenidas con UV-Vis (fructosa: 2622731 *vs.* 222681; sacarosa: 8120887 *vs.* 134955), lo que sugiere que, a pesar de sus diferencias en respuesta instrumental, ambos detectores proporcionan resultados cuantitativos comparables bajo las condiciones evaluadas.

Tabla 3. Cuantificación de carbohidratos en la bebida gaseosa mediante HPLC con detector UV-Vis y DIR

Analito	UV-Vis			DIR		
	Área (DE)	Conc. diluida* mg·mL^{-1} (DE)	Conc. muestra g·100 mL^{-1}	Área (DE)	Conc. diluida* mg·mL^{-1} (DE)	Conc. muestra g·100 mL^{-1}
Fructosa	222681 (3547)	7.49 (0.12)	**2.25**	2622731 (62615)	7.15 (0.17)	**2.15**
Glucosa	101596 (1157)	12.25 (0.14)	**3.67**	2979624 (24666)	7.15 (0.06)	**2.14**
Sacarosa	134955 (2656)	22.69 (0.45)	**6.81**	8120887 (23721)	22.36 (0.06)	**6.71**
Total	-	-	**12.73**	-	-	**10.99**

Nota: Valores expresados como su media ($n = 5$); DE = desviación estándar; *Muestra diluida (1:2); CV < 3 %; Total = suma de fructosa + glucosa + sacarosa.

En contraste, la glucosa determinada en el detector UV-Vis fue significativamente mayor respecto a DIR (3.7 *vs.* 2.1 g·100 mL^{-1}; $p < 0.001$). La señal parcialmente superpuesta observada en el cromatograma UV-Vis (**Figura 4**) en la región de elución de la glucosa sugiere la presencia de un posible compuesto coeluyente o interferencia de matriz, lo que incrementó el área integrada del pico y ocasionó una mayor cuantificación de este analito. En contraste, el cromatograma obtenido mediante DIR no mostró una señal adicional evidente en esta región del cromatograma, permitiendo una cuantificación más confiable bajo las condiciones evaluadas.

En cuanto al contenido total de azúcares determinado mediante DIR, este fue de 10.99 g·100 mL^{-1} (equivalente a 38.9 g por porción de 355 mL), en concordancia con el contenido declarado en el etiquetado nutricional de la bebida (39 g por 355 mL) [22] y con el intervalo reportado por Hafner et al. [23] para bebidas carbonatadas (9.5-11.0 g·100 mL^{-1}). Por el contrario, el valor obtenido mediante UV-Vis (12.73 g·100 mL^{-1}) presentó una sobreestimación, posiblemente asociada con la contribución de señales interferentes en la cuantificación de glucosa. Estos resultados evidencian la importancia de la resolución cromatográfica y de la selectividad del sistema de detección para la cuantificación de azúcares en matrices complejas [7, 8].

La concordancia observada para fructosa y sacarosa muestra que, cuando las señales cromatográficas están adecuadamente resueltas y libres de interferencias, tanto el detector UV-Vis como el DIR proporcionan resultados cuantitativos comparables. Este comportamiento fue consistente con lo observado en las soluciones estándar, donde ambos sistemas presentaron elevada linealidad ($R^2 > 0.998$) y precisión (CV < 3%). En contraste, la discrepancia observada en la

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

cuantificación de glucosa, ausente en los estándares, sugiere que la composición de la matriz influyó en la cuantificación obtenida mediante UV-Vis. Estudios previos han señalado que, en matrices alimentarias complejas, componentes adicionales pueden generar señales interferentes o contribuir a la absorción espectral en la región utilizada para la cuantificación [7, 15]. En conjunto, estos resultados evidencian que el desempeño del detector UV-Vis depende en mayor medida de la composición de la matriz, mientras que el detector DIR mostró una respuesta más robusta para la cuantificación de carbohidratos en la bebida evaluada.

Desde una perspectiva de aplicación, el método propuesto combina la separación HILIC con detección UV-Vis directa a 192 nm, permitiendo la cuantificación de carbohidratos sin recurrir a procedimientos de derivatización. Cuando la resolución cromatográfica es adecuada, esta estrategia presentó linealidad, precisión y capacidad de cuantificación comparables a las obtenidas con el detector DIR. El empleo de detectores convencionales como UV-Vis y DIR, ampliamente disponibles en laboratorios y con menores requerimientos de infraestructura que detectores especializados para carbohidratos (como CAD, PAD o ELSD) [10, 11, 15], favorece la implementación del método para análisis rutinarios y control de calidad de muestras con concentraciones relativamente elevadas de carbohidratos. En contraste, las metodologías basadas en detectores especializados requieren instrumentación y condiciones operativas específicas, lo que puede incrementar la complejidad de su implementación en determinados entornos analíticos [7, 10-12]. En este contexto, la combinación de HILIC con detección UV-Vis profunda directa representa una alternativa práctica y accesible para laboratorios que requieren análisis rutinarios de carbohidratos sin recurrir a instrumentación especializada.

Si bien los hallazgos permiten establecer tendencias claras en el desempeño de ambos sistemas de detección, éstos derivan del análisis de una única matriz alimentaria. La evaluación de muestras con composiciones más diversas permitirá ampliar el alcance de las conclusiones obtenidas y confirmar la aplicabilidad del método en diferentes alimentos. Asimismo, estrategias de procesamiento de señal o mejoras en la resolución cromatográfica podrían contribuir a reducir interferencias y mejorar el desempeño de la detección UV en estudios futuros.

CONCLUSIÓN

La comparación entre los detectores UV-Vis y de índice de refracción mostró que ambos sistemas permitieron la cuantificación de fructosa, glucosa y sacarosa mediante HPLC en modo HILIC, con adecuada linealidad y precisión en el intervalo evaluado. Sin embargo, la detección UV-Vis directa a 192 nm mostró mayor susceptibilidad a interferencias de matriz bajo las condiciones cromatográficas evaluadas, lo que se reflejó en la sobreestimación de glucosa en la bebida analizada. En contraste, el detector DIR presentó mayor sensibilidad instrumental bajo las condiciones evaluadas y proporcionó una estimación del contenido total de azúcares más consistente con el contenido esperado para la muestra, evidenciando un desempeño analítico más robusto.

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

Estos hallazgos, obtenidos en una única matriz alimentaria, permiten establecer tendencias claras sobre el desempeño de ambos sistemas de detección y sugieren la necesidad de ampliar su evaluación en matrices de mayor diversidad para confirmar su alcance. No obstante, los resultados obtenidos aportan criterios útiles para la selección del sistema de detección más apropiado de acuerdo con la complejidad de la matriz y los requerimientos del análisis.

REFERENCIAS

[1] A. Varki, "Biological roles of glycans," Glycobiology, vol. 27, no. 1, pp. 3–49, 2017, doi: 10.1093/glycob/cww086.

[2] L. Rong, M. Shen, Y. Zhang, H. Yu y J. Xie, "Food polysaccharides and proteins: Processing, characterization, and health benefits," Foods, vol. 13, no. 7, p. 1113, 2024, doi: 10.3390/foods13071113.

[3] D. Gaikwad, R. Sutar y D. Patil, "Polysaccharide mediated nanodrug delivery: A review," Int. J. Biol. Macromol., vol. 261, Art. no. 129547, 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129547.

[4] C. Alisi, L. Bacchetta, E. Bojorquez, M. Falconieri, S. Gagliardi, M. Insaurralde et al., "Mucilages from different plant species affect the characteristics of bio-mortars for restoration," Coatings, vol. 11, no. 1, p. 75, 2021, doi: 10.3390/coatings11010075.

[5] M. Shivakumar, T. Selvaraj y M. P. Dhassaih, "Preparation and characterization of ancient recipe of organic lime putty: Evaluation for its suitability in restoration of Padmanabhapuram Palace, India," Sci. Rep., vol. 11, no. 1, Art. no. 13261, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-91680-8.

[6] X. Chen, Y. Wang, Y. Ye, H. Yu y B. Wu, "The pre- and post-column derivatization on monosaccharide composition analysis: A review," Chem. Biodivers., vol. 21, no. 8, Art. no. e202400749, 2024, doi: 10.1002/cbdv.202400749.

[7] L. A. Kartsova, A. V. Maliushevska y E. A. Kolobova, "Analytical capabilities of the determination of carbohydrates by chromatographic and eelectrophoretic methods" J. Anal. Chem., vol. 78, no. 2, pp. 144–161, 22023, doi 10.31857/S0044450223020044.

[8] E. Akyüz, K. S. Başkan, E. Tütem y R. Apak, "High-performance liquid chromatographic method with post-column detection for quantification of reducing sugars in foods," J. Chromatogr. A, vol. 1660, Art. no. 462664, 2021, doi: 10.1016/j.chroma.2021.462664.

[9] H. S. Yates, J. F. Carter, A. Joseph, M. Chaussende, M. T. Fletcher, V. Santiago y N. L. Hungerford, "An introduction to simple saccharides and oligosaccharides, and a decadal review of their analysis in food by ion chromatography and ion chromatography/mass spectrometry," Food Sci. Nutr., vol. 13, no. 110, Art.no. e70855, 2025, doi: 10.1002/fsn3.70855.

[10] X. Yan, "Carbohydrate analysis by high-performance liquid chromatography (HPLC) with evaporative light-scattering detection (ELSD)," en Carbohydrate Analysis by

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

Modern Liquid Phase Separation Techniques, Z. El Rassi, Ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022025, doi4, doi: 10.1016/B978-0-12-821447-3.00013-5.

[11] J. S. Rohrer, "A practical guide for carbohydrate determinations by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection (HPAE-PAD)," en Ion Chromatography: Instrumentation, Techniques and Applications, N. A. Pohl, N. Avdalovic y K. Srinivasan, Eds. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021, pp. 233–257, doi: 10.1016/B978-0-12-813075-9.00011-X.

[12] W. W. Barnhart, M. Q. Farooq y I. A. H. Ahmad, "A simplified tutorial on charged aerosol detection:Understanding the basics, optimization, and troubleshooting," J. Chromatogr. Open, vol. 6, Art. no. 100181, 2024, doi: 10.1016/j.jcoa.2024.100181.

[13] X. Shen y H. Perreault, "Characterization of carbohydrates using a combination of derivatization, high-performance liquid chromatography and mass spectrometry," J. Chromatogr. A, vol. 811, no. 1–2, pp. 47–59, 1998, doi: 10.1016/S0021-9673(98)00238-6.

[14] G. Nagy, T. Peng y N. L. Pohl,"Recent liquid chromatographic approaches and developments for the separation and purification of carbohydrates," Anal. Methods, vol. 9, no. 24, pp. 3579–3593, 2017, doi: 10.1039/C7AY01094J.

[15] J. A. Serafim, R. F. Silveira y E. F. Vicente,"Fast determination of short-chain fatty acids and glucose simultaneously by ultraviolet/visible and refraction index detectors via high-performance liquid chromatography," Food Anal. Methods, vol. 14, no. 12, pp. 2489–2498, 2021, doi: 10.1007/s12161-021-01990-w.

[16] I. Jalaludin y J. Kim, "Comparison of ultraviolet and refractive index detections in the HPLC analysis of sugars," Food Chem., vol. 365, Art. no. 130514, 2021, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.130514.

[17] International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use, Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology Q2(R1), 2005. [En línea]. Disponible: https://database.ich.org/sites/default/files/Q2_R1__Guideline.pdf [Consultado: 09-nov-2025].

[18] P. Borman y D. Elder, "Q2(R1) Validation of Analytical Procedures," en ICH Quality Guidelines: An Implementation Guide, A. Teasdale, D. Elder y R. W. Nims, Eds. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017, doi: 10.1002/9781118971147.ch5.

[19] C. Ma, Z. Sun, C. Chen, L. Zhang y S. Zhu, "Simultaneous separation and determination of fructose, sorbitol, glucose and sucrose in fruits by HPLC–ELSD," Food Chem., vol. 145, pp. 784–788, 2014, doi: 10.1016/j.foodchem.2013.08.135.

[20] P. Jandera y P. Janás, "Recent advances in stationary phases and understanding of retention in hydrophilic interaction chromatography: A review," Anal. Chim. Acta, vol. 967, pp. 12–32, 2017, doi: 10.1016/j.aca.2017.01.060.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

[21] A. Y. Laptev, N. B. Rozhmanova y P. N. Nesterenko, “Retention behavior of carbohydrates on metal loaded chelating stationary phase under conditions of hydrophilic interaction liquid chromatography,” J. Chromatogr. A, vol. 1714, Art. no. 464551, 2024, doi: 10.1016/j.chroma.2023.464551.

[22] The Coca-Cola Company, “Coca-Cola Original: Nutrition facts & ingredients,” The Coca-Cola Company, Atlanta, GA, USA, 2025. [En línea]. Disponible: https://www.coca-cola.com/us/en/brands/coca-cola/products/original [Consultado: 09-nov-2025].

[23] E. Hafner, Ž. Lavriša, M. Hribar, S. Krušič, A. Kušar, K. Žmitek et al., “Verifying the use of food labeling data for compiling branded food databases: A case study of sugars in beverages,” Front. Nutr., vol. 9, Art. no. 794468, 2022, doi: 10.3389/fnut.2022.794468.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6687

Efecto de un plasma pulsado de aire en las propiedades superficiales de caucho butílico

Effect of a pulsed air plasma on the surface properties of butyl rubber

Alarcón-Hernández F.B.[1]*, Fuentes-Albarrán M. del C.[1], Garay-Galicia J.A.[1], Sandoval-Gonzáles A.[2]

[1]Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos
Avenida Nicolas Bravo s/n, Xalostoc CP 62725 Ayala, Morelos, México.
[2]Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C
Parque Tecnológico Querétaro SN, CP 76703 San Fandila, Querétaro, México.
*honorato@uaem.mx

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2025

ABSTRACT

The use of pulsed air plasma was evaluated as an option for modifying the physical properties of butyl rubber, with an emphasis on controlled surface wear. Commercial rubber samples (1.0 cm × 5.0 cm) obtained from bicycle inner tubes were used. All samples exposed to plasma were previously subjected to a 44 day acetone pretreatment to analyse the effects of the solvent before plasma treatment. The experimental design included 21 samples (three controls, three samples subjected to acetone bath pretreatment, and 15 samples subjected to acetone bath pretreatment plus air plasma exposure). Measurements of mass, contact angle, hardness, and elasticity were performed before and after treatment. Plasma was applied in a vacuum chamber using a radiofrequency generator (Cesar 136 RF, 600 W output), an impedance matching network (Navío), and a vacuum pump (Labconco model 117LA65312906). The conditions were: 250 W power, 3 cm electrode spacing, 10 minutes exposure time, and pulse frequencies between 10 000 and 30 000 Hz. The results show mass loss (2.30% at 15,000 Hz, 1.64% at 30,000 Hz) and a decrease in hydrophobicity (130.11° at 15,000 Hz, 100.75° at 30,000 Hz). Furthermore, mechanical testing showed an increase in hardness (54.00 HA at 20,000 Hz, 52.17 HA at 30,000 Hz), along with changes in Young's modulus (3.76 MPa at 20,000 Hz, 2.81 MPa at both 30,000 and 10,000 Hz). It is concluded that pulsed air plasma is an effective alternative for the frequency-dependent surface modification of butyl rubber. Such changes may have potential applications in recycling and materials bonding.

Keywords: Degradation**;** elasticity; hardness; hydrophobicity; polymer.

INTRODUCTION

Butyl rubber has been commercially produced since 1942. It is an elastomeric polymer widely used in adhesives and sealants as a binder and adhesion modifier. This material exhibits special properties, including low gas permeability, good water and chemical resistance, and poor oil resistance [1]. Synthetic butyl rubber can be used over a wide temperature range, making it an ideal

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

candidate for applications such as tire inner tubes, roof membranes, and refrigeration system seals [2]. However, when used at interfaces where adhesion, coating, or surface interaction with other materials are critical, limitations arise due to its relatively inert nature. From this perspective, surface treatment is a key strategy for enhancing compatibility with adhesives, coatings, or substrates, thereby optimising functionality in systems such as gaskets, membranes, linings, or shock absorbers. It is highly relevant to experimentally investigate how advanced surface modification techniques can transform the surface layer of butyl rubber without compromising its fundamental properties.

The application of pulsed plasma in an air atmosphere presents itself as a clean, controllable, and potentially scalable alternative that can generate functional groups on the rubber surface [3, 4] and increase surface energy, thereby promoting adhesion, facilitating subsequent coating, and enhancing wettability [5, 6]. It has also been observed that, in rubber elastomers treated with atmospheric plasma, the surface energy increases by 58 % and the polar component by 95 % [7, 8], which has a positive impact on coating adhesion and ageing behaviour [7, 9]. Given the previously mentioned characteristics of the effects and manageability of low-pressure air plasma used as a treatment to modify surfaces in general, and in particular synthetic rubber samples, this research aims to analyse, from a first approach, the effect of a pulsed low-pressure air plasma on the surface properties of vulcanised butyl rubber, evaluating parameters such as: mass loss, hydrophobicity, elasticity and hardness, in order to determine the optimal treatment conditions and their impact on the functionality of the material's surface.

EXPERIMENTAL METHODOLOGY

Butyl Rubber. Commercial butyl rubber (used in bicycle inner tubes) was used in samples with dimensions of 1.0 cm × 5.0 cm (**Figure 1**).

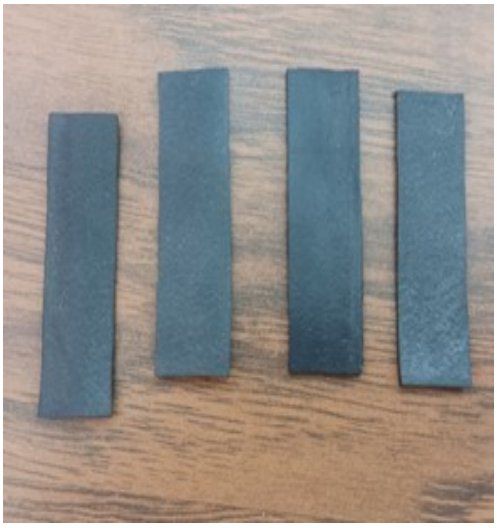


Figure 1. Butyl rubber samples

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

All samples were washed with soap and water before any processing. 21 samples were considered (three controls, three subjected to acetone bath pretreatment, and 15 subjected to acetone bath pretreatment plus exposure to air plasma).

Acetone Pretreatment. The acetone bath pretreatment consisted of immersing 18 rubber samples in a sealed glass container of acetone for 44 days. This was done to modify and weaken the material's polymer network. After this time, the samples were placed in containers at room temperature (26 °C) and in air to allow the acetone to evaporate. The evaporation time for each sample was 30 minutes.

Plasma Treatment. The plasma treatments consisted of exposing each sample of interest, one at a time, to a low-pressure air plasma (2 Torr). The plasma generation parameters were fixed (Power: 250 W), as were the exposure time (10 minutes) and the electrode separation distance (3 cm). The variable that was modified in each treatment was the plasma generation frequency. **Table 1** presents the values considered for each treatment.

Table 1. Plasma frequency values according to treatment

Treatment	Frequency (Hz)
1	10 000
2	15 000
3	20 000
4	25 000
5	30 000
Control	Without treatment
Acetone pretreatment	Without plasma treatment

Experimental Apparatus. Figure 2 shows a schematic of the experimental apparatus used. It consists of a hermetically sealed glass chamber, two aluminium electrodes, a vacuum system (digital vacuum gauge: CPS, vacuum pump: LABCONCO), and a radiofrequency plasma generator (Cesar 136 RF Output 600 W).

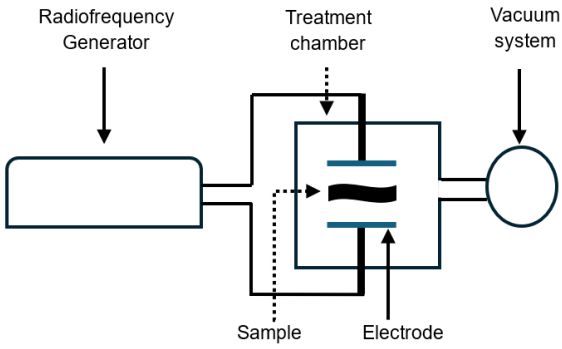


Figure 2. Schematic of experimental apparatus for plasma treatment

The sample (butyl rubber) is placed between the two electrodes, and a vacuum is applied (2 Torr). The plasma is then generated according to the treatment specifications. Each sample is exposed to the plasma for 10 minutes. After this time, the treatment is stopped, and the sample is removed.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

The above procedure is repeated for subsequent samples. Three repetitions of each treatment were performed. The reported results are the average value of the three repetitions for each variable of interest.

The experimental conditions were defined to conduct a controlled, preliminary study, keeping pressure, power, treatment time, and electrode spacing constant to isolate the effect of frequency as the main variable. These values were chosen to generate surface modifications through reactive species without significantly affecting the material. Furthermore, the frequency range was selected to assess its influence on plasma-surface interactions. The inclusion of control samples and samples pretreated in acetone is intended to establish comparisons and attribute the observed changes exclusively to the plasma treatment.

Measurement of the variable of interest. The effect of plasma on the samples was determined by measuring mass change (analytical balance: AE-ADAM, model PW254), hydrophobicity (sessile droplet technique, digital microscope: Microscope 1600X Black), hardness (durometer: Shore A Durometer, 0-100 HA), and elasticity (dynamometer MS-A09L).

Specifically, hydrophobicity was determined by measuring the external angle between the surface of interest and a droplet of distilled water (a slight angle ($\theta < 90°$) indicates a hydrophobic surface, a large angle ($\boldsymbol{\theta > 90°}$) indicates a hydrophilic surface), as shown in **Figure 3.**

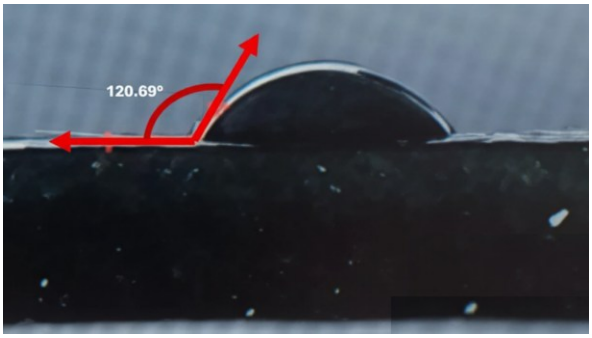


Figure 3. Measurement of the contact angle (hydrophobicity) between a drop of distilled water and a plasma-treated butyl rubber surface.

Elasticity was determined using the equation for calculating Young's Modulus:

$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l_0}$$

Where:

E: Young's modulus, F: force applied to the sample, A: surface area of the sample, Δl: change in length, and l_0: initial length of the sample. Materials with higher Young's modulus have greater stiffness and less elastic deformability under applied load.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

RESULTS

The results of the behaviour of the measured variables as a function of each defined treatment are presented.

Mass loss. Figure 4 shows the results of the percentage mass loss. The data from the butyl rubber samples subjected to low-pressure air plasma treatments show an increase in surface degradation as the treatment frequency decreases.

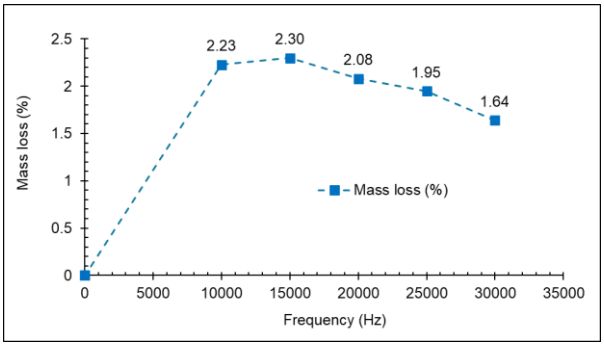


Figure 4. Mass change of the treated samples in percentage terms

All samples lost a certain percentage of mass; however, it was observed that as the plasma pulse frequency increased, the loss decreased. The maximum percentage loss corresponded to plasma generated at 15 000 Hz, and the minimum at 30 000 Hz. For the samples pretreated with acetone, there was no measurable mass loss.

Hydrophobicity. The hydrophobicity of a material can be determined in terms of the contact angle between a drop of distilled water and the surface of interest. In this case, a larger contact angle indicates lower hydrophobicity, since a smaller angle indicates a lower affinity of the liquid for the solid surface.

From **Figure 5**, it can be seen that the change in contact angle measured in the butyl rubber samples treated with plasma at different frequencies, shows an initial tendency to increase the angle with respect to the control sample (98.39°) and the one treated with acetone (96.87°), reaching a maximum value of 130.11° at a frequency of 15 000 Hz.

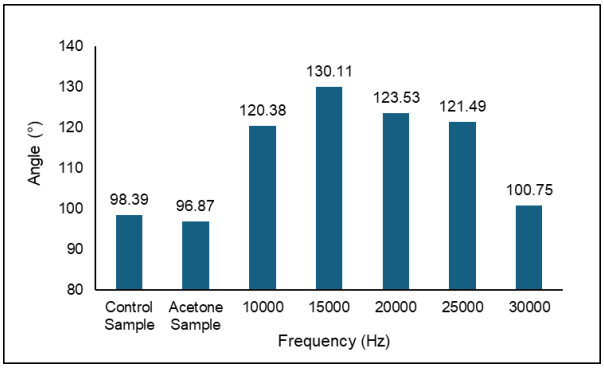


Figure 5. Modification of the contact angle (hydrophobicity) of treated samples as a function of plasma treatments

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

A progressive decrease in the angle is also evident as the frequency increases, reaching a value of 100.75° at 30 000 Hz, which is close to that of the untreated material.

Hardness. The hardness data shown in **Figure 6** for the butyl rubber samples treated with plasma at different frequencies reveal a moderate variation compared to the control sample (51.33 HA) and the sample pretreated with acetone (52.00 HA).

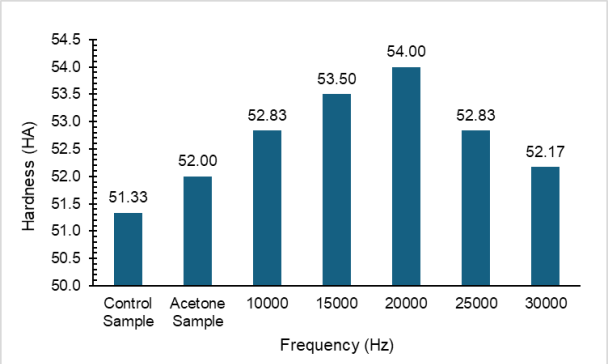


Figure 6. Variation of hardness values in plasma-treated samples as a function of plasma frequency

A progressive increase in hardness is observed with increasing plasma frequency, reaching a maximum value of 54.00 HA at 20 000 Hz. A slight decrease in the variable of interest then occurs as the frequency increases, reaching a value of 52.17 HA at 30 000 Hz. Overall, the results indicate that the hardness of butyl rubber can be modulated by plasma treatments, with frequency being a key parameter for controlling the material's surface mechanical properties with respect to this variable.

Elasticity. The study of the change in elasticity (Young's Modulus) of the polymer of interest (butyl rubber) exposed to a plasma of different generation frequencies (increasing frequencies) shows that this variable varies non-linearly with the plasma frequency, resulting in points of greater stiffness at specific frequencies, as can be seen in **Figure 7.**

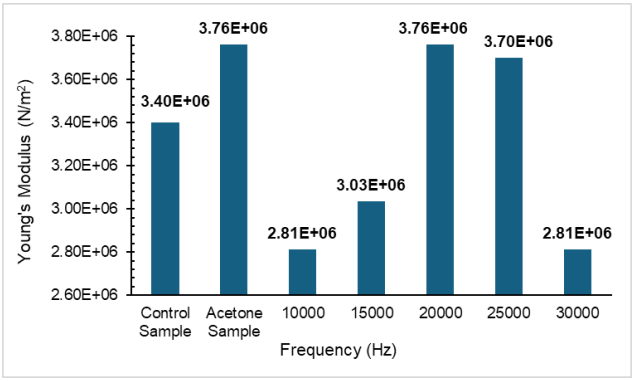


Figure 7. Modification of the elasticity (Young's modulus) of butyl rubber as a function of plasma treatments

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

The reference values, designated as the Control Sample and Acetone Sample, showed Young's moduli of 3.4 MPa and 3.76 MPa, respectively, indicating an initial decrease in elasticity following acetone treatment. Furthermore, when the material was subjected to plasma at 10 000 Hz, the Young's modulus decreased to 2.81 MPa, suggesting a reduction in the material's stiffness. At 15 000 Hz, the value increased slightly to 3.03 MPa, but remained below the values of both the control sample and the acetone-treated sample. A peak of 3.76 MPa was observed at 20 000 Hz, matching the result observed with the acetone-treated sample. Subsequently, at 25 000 Hz, the modulus was 3.70 MPa, before decreasing again to 2.81 MPa at 30 000 Hz.

DISCUSSION

It is known that air plasma treatment generates reactive species (positive ions, negative ions, and radicals) that interact with the surface of the samples of interest, causing various physicochemical processes. These processes include reaction with surface contaminants and additives of the samples, the breaking of bonds in the outer layer of the polymer with the generation of free radicals, the incorporation of oxygenated functional groups (–OH, >C=O, –COOH), the possible appearance of surface crosslinking or chain cleavage degradation, and the modification of surface roughness. Some studies have shown that plasma exposure can increase the surface hardness of samples, attributed to densification from polymer crosslinking [13]. Although adding oxygenated groups tends to reduce hydrophobicity, partial hydrophobic recovery has been observed over time, a phenomenon known as hydrophobic recovery [7]. As reported in other studies, these transformations induce characteristic effects in the samples. These include increased surface energy (leading to higher wettability) [11], variations in roughness, changes in surface crosslinking density (resulting in increased hardness) [12], and mass losses due to the removal of contaminants, additives, or polymer fragments.

The nature of the dominant effect depends on parameters such as exposure time, the type of gas or plasma, and the ionisation power or density (Initially, the formation of functional groups predominates, while at longer times or higher power levels, crosslinking or degradation processes may prevail [6, 12]).

Some studies have shown that plasma exposure can increase the surface hardness of samples, attributed to densification from polymer crosslinking [13]. Although adding oxygenated groups tends to reduce hydrophobicity, partial hydrophobic recovery has been observed over time, a phenomenon known as hydrophobic recovery [7].

In particular, the behaviour observed in the treatment of butyl rubber using plasmas of different frequencies can be explained by considering the greater interaction between the ionised gas and the polymer surface under lower frequency conditions. At such (low) frequencies, the interaction time of the active species (ions, free radicals, electrons, and excited molecules) is longer, allowing for more efficient energy transfer to the samples, facilitating ablation processes, surface oxidation, and cleavage of C–H and C–C bonds in the polymer chain [6, 12, and 14]. This phenomenon explains why mass loss and surface modification are more relevant at frequencies between 10 000

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

and 15 000 Hz, while at higher frequencies (30 000 Hz), the duration of the interaction decreases, limiting the effects of exposure [15].

The most significant mass loss occurred in the 15 000 Hz sample (implying a strong cleaning or removal process), and the generation of a high density of oxygenated groups on the surface would be expected, leading to a decrease in hydrophobicity [10]. Logically, the lower hydrophobicity coincides with the frequency of maximum mass removal (cleaning of hydrophobic additives such as waxes and oils). Exposure of the polymer matrix, along with the formation of polar groups, reduces the hydrophobic character of the samples. On the other hand, the introduction of oxygenated functional groups (–OH, >C=O, –COOH) onto the rubber surface increases polarity and, therefore, decreases hydrophobicity [16, 17].

Furthermore, a change in hardness after plasma treatment is consistent with a surface hardening mechanism. The surface layer of rubber is chemically modified through chain breaks, micro-crosslinking, surface oxidation, and possibly surface layer compaction, which reduces local deformability and increases hardness. Studies indicate that surface crosslinking (or densification) can occur, increasing the stiffness of the surface layer of some polymers [11, 12].

In the experiment, hardness reached its maximum at 20 000 Hz, indicating that at this frequency, the plasma transferred sufficient energy to promote surface hardening without causing excessive network destruction. At 15 000 Hz (the second-highest hardness), the material removal process was stronger (as evidenced by mass loss), but the hardening process was still underway.

It can be understood that at 20 000 Hz, a stiffer surface layer was generated (higher density of crosslinks, greater surface oxidation), resulting in greater hardness [11, 12]. At lower frequencies, the effect was less pronounced. At very high frequencies, damage or degradation could occur, inhibiting an increase in hardness.

Similarly, changes generated on the rubber surface by low-pressure air plasma, through the formation of oxygenated functional groups (carbonyls, hydroxyls, and peroxides), increase the material's Young's modulus, resulting in greater stiffness at intermediate frequencies [16]. On the other hand, when the plasma frequency is excessive, surface degradation or the removal of functional groups can be triggered [14].

In general, a nonlinear behaviour is observed for the various quantified variables, highlighting the sensitivity of butyl rubber to plasma treatment conditions and the importance of optimising parameters such as frequency. Intermediate frequencies, such as those near 20 000 Hz, appear to offer an optimal balance between treatment intensity and preservation of the polymer's surface integrity [15, 16]. This behaviour reflects what has been reported in the literature. Plasma modification initially produces an increase in polarisation and roughness (improving wettability) [17]. Subsequently, with further exposure, surface hardening (crosslinking) occurs, increasing hardness and reducing elasticity. Finally, excessive treatment can generate surface damage or microcracks in the surface layer, which may restore some elasticity or promote other mechanisms [12,13].

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

CONCLUSION

Pulsed air plasma treatment at low pressure modified the surface properties of interest in butyl rubber as a function of the plasma generation frequency. The observed behaviours (maximum mass loss and lower hydrophobicity at 15 000 Hz, greater hardness at 20 000 Hz, and greater elasticity at 10 000 and 30 000 Hz) are related to surface modification mechanisms of the rubber, including material degradation, functionalisation with polar groups, surface hardening (crosslinking), and damage or weakening of the surface layer under extreme regimes. The plasma frequency is a fundamental variable that can indirectly reflect the energy and ionisation density of the system; therefore, modifying it reveals the predominance of different interaction mechanisms. Adjusting the plasma characteristics (frequency, exposure time, and generation pressure) can modify the surface properties of samples of interest, as needed for their practical applications.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc of Universidad Autónoma del Estado de Morelos, for the facilities provided to carry out this research. This work was funded by PRODEP [DSA/103.5/14/10703].

REFERENCES

[1] S. Ebnesajjad y A. H. Landrock, “Classification of adhesives and compounds,” en Adhesives Technology Handbook, 3rd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2015, pp. 67–83, doi: 10.1016/B978-0-323-35595-7.00004-8.

[2] Chembroad, “Caucho sintético butílico: propiedades, usos y aplicaciones,” 2024. [En línea]. Disponible:https://www.chembroad.com/es/butyl-synthetic-rubber-properties-uses-and-applications/ [Consultado: 28-oct-2025].

[3] L. Benyahia, M. Ji y F. Poncin-Epaillard, “Mechanical behaviour of plasma-treated metal-rubber assemblies,” Molecules, vol. 29, no. 23, p. 5590, 2024, doi: 10.3390/molecules29235590.

[4] J. Tyczkowski, J. Balcerzak, J. Sielski y I. Krawczyk-Kłys, “Effect of carbon black nanofiller on adhesion properties of SBS rubber surfaces treated by low-pressure plasma,” Polymers, vol. 12, no. 3, p. 616, 2020, doi: 10.3390/polym12030616.

[5] G. Primc y M. Mozetič, “Surface modification of polymers by plasma treatment for appropriate adhesion of coatings,” Materials, vol. 17, no. 7, p. 1494, 2024, doi: 10.3390/ma17071494.

[6] M. A. Martínez, J. Abenojar y D. García-Pozuelo, “Effect of plasma treatment on coating adhesion and tensile strength in uncoated and coated rubber under aging,” Materials, vol. 18, no. 2, p. 427, 2025, doi: 10.3390/ma18020427.

[7] S. Ďurišová, M. Pajtášová, D. Ondrušová, R. Janík, Z. Mičicová y A. Dubec et al., “Effect of low-temperature plasma treatment on rubber properties,” Polimery, vol. 69, no. 4, 2024, doi: 10.14314/polimery.2024.4.5.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

[8] R. Lee, D. Xuan-Nghia, J. Young-Oh y T. Il-Lee, "Adhesion strength enhancement of butyl rubber and aluminium using nanoscale self-assembled monolayers of various silane coupling agents for vibration damping plates," Nanomaterials, vol. 14, no. 18, p. 1480, 2024, doi: 10.3390/nano14181480.

[9] N. Connolly, M. Hysick, D. E. Barlaz, R. Garza, G. Lunardi y D. N. Ruzic, "Characterisation of elastomer degradation in O_2/Ar plasma via mass and surface morphology changes," J. Vac. Sci. Technol. A, vol. 42, Art. no. 023004, 2024, doi: 10.1116/6.0003240.

[10] J. Tyczkowski, J. Balcerzak, J. Sielski y I. Krawczyk-Kłys, "Effect of carbon black nanofiller on adhesion properties of SBS rubber surfaces treated by low-pressure plasma," Polymers, vol. 12, no. 3, p. 616, 2020, doi: 10.3390/polym12030616.

[11] J. Tyczkowski, H. Kierzkowska-Pawlak, J. Sielski y I. Krawczyk-Kłys, "Low-temperature plasma modification of styrene-butadiene block copolymer surfaces for improved adhesion: A kinetic approach," Polymers, vol. 12, no. 4, p. 935, 2020, doi: 10.3390/polym12040935.

[12] C. Bai, Z. Gong, L. An, L. Qiang, J. Zhang y G. Yushkov et al., "Adhesion and friction performance of DLC/rubber:The influence of plasma pretreatment," Friction, vol. 9, no. 3, pp. 627–641, 2021, doi: 10.1007/s40544-020-0436-6.

[13] E. Vassallo, M. Aloisio, M. Pedroni,F. Ghezzi, P. Cerruti y R. Donnini,"Effect of low-pressure plasma treatment on the surface wettability of poly (butylene succinate) films,"Coatings, vol. 12, no. 2, p. 220, 2022, doi: 10.3390/coatings12020220.

[14] T. Dufour, "From basics to frontiers: A comprehensive review of plasma-modified and plasma-synthesised polymer films," Polymers, vol. 15, no. 17, p. 3607, 2023, doi: 10.3390/polym15173607.

[15] K. Molnar, B. Józsa, D. Barczikai, E. Krisch, J. E. Puskás y A. Jedlovszky-Hajdu, "Plasma treatment as an effective tool for crosslinking of electrospun fibres," J. Mol. Liq., vol. 303, Art. no. 112628, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.112628.

[16] G. Primc y M. Mozetič, "Hydrophobic recovery of plasma-hydrophilised polyethene terephthalate polymers," Polymers, vol. 14, no. 12, p. 2496, 2022, doi: 10.3390/polym14122496.

[17] P. Pongsopa, K. Honglertkongsakul y P. Homhuan, "Surface modification on vulcanised rubber by DBD plasma," Adv. Mater. Res., vol. 1119, pp. 375–378, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.375.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6686

Journal of Energy, Engineering, Optimization and Sustainability

Segundo-Díaz, T. de J.[1]
Vol.10 Núm. 3: 2026 pág. 104-116

Estudio del tiempo de fraguado en pastas de cemento con sustitución parcial por biocemento de ostión

Setting time study of cement pastes with partial replacement by oyster shell biocement

Segundo-Díaz T. de J.[1], Mora-Ortiz R.S.[1]*, Díaz-Alvarado S.A.[1], Ramón-de los Santos C. [2]

[1]División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km 1. CP. 86690, Cunduacán, Tabasco, México.
[2]Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco, Carretera vecinal Comalcalco-Paraíso Km 2. Ra. Occidente 3ra. Sección, C.P. 86651, Comalcalco, Tabasco, México.
*rene.mora@ujat.mx

Artículo Científico
Publicado: 15 de diciembre 2026

RESUMEN

En esta investigación se analizó el efecto del biocemento elaborado a partir de concha de ostión en los tiempos de fraguado de pastas de cemento. Las conchas fueron calcinadas a diferentes temperaturas (150, 300, 500, 750 y 900 °C), molidas manualmente y tamizadas hasta pasar la malla ASTM No. 100 (0.150 mm). De estos tratamientos de calcinado se obtuvieron cinco tipos de biocemento (uno para cada temperatura). Posteriormente, se prepararon pastas de cemento donde se sustituyó el 10 % en peso del cemento Portland comercial por cada tipo de biocemento además de una mezcla de control sin sustitución. El tiempo de fraguado inicial y final se midió utilizando el aparato de Vicat. Todas las mezclas se elaboraron con una fluidez de 170 ± 5 mm para mantener condiciones similares de trabajabilidad. Los resultados mostraron que el fraguado se retrasa con el uso de biocemento calcinado a baja temperatura, mientras que a mayor temperatura de calcinación el fraguado tiende a acelerarse. La mezcla con biocemento calcinado a 900 °C presentó tiempos similares a la mezcla de control, lo cual puede asociarse con una mayor formación de óxido de calcio, de acuerdo con lo reportado en estudios previos sobre conchas de ostión calcinadas. Los resultados permitieron concluir que el biocemento de concha de ostión, calcinado a 900 °C y utilizado como sustituto parcial del cemento en un 10 %, puede utilizarse en mezclas de cemento sin afectar significativamente los tiempos de fraguado, los cuales resultaron comparables a los del cemento convencional.
Palabras clave: biocemento; concha de ostión; fraguado inicial; fraguado final; Vicat.

ABSTRACT

This study analyzed the effect of biocement made from oyster shells on the setting times of cement pastes. The shells were calcined at different temperatures (150, 300, 500, 750, and 900 °C), manually ground, and sieved to pass through ASTM No. 100 mesh (0.150 mm). These calcination processes produced five types of biocement, one for each temperature. Cement pastes were then prepared by replacing 10% by weight of commercial Portland cement with each type of biocement, along with a control mixture without substitution. The initial and final setting times

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

were measured using the Vicat apparatus. All mixtures were prepared with a flow value of 170 ± 5 mm to ensure similar workability conditions.
The results showed that setting was delayed when using biocement calcined at lower temperatures, while higher calcination temperatures tended to accelerate the setting process. The paste with biocement calcined at 900 °C showed setting times similar to those of the control mixture, which may be associated with greater formation of calcium oxide, according to previous studies on calcined oyster shells. Based on the results, it was concluded that oyster shell biocement, calcined at 900 °C and used as a 10% partial replacement of cement, can be used in cement pastes without significantly affecting setting times, which were found to be comparable to those of conventional cement.
Keywords: biocement; oyster shell; initial setting; final setting; Vicat.

INTRODUCCIÓN

México se encuentra entre los primeros 10 lugares a nivel mundial en la producción de cultivo de ostión lo que en el año 2023 representó 20,237.68 toneladas de este molusco [1]. El estado de Tabasco es el segundo productor a nivel nacional de este alimento marino, aportando a la producción nacional un 24.7 %, dejando ingresos por año de 13,674 millones de pesos [2]. Lo anterior deja en evidencia que el cultivo de ostión representa una actividad económica de profundo impacto social en la entidad. Del peso total de ostión, solo el 10 % es aprovechable, ya que el 90 % de su peso es debido a su concha, la cual es desechada [3]. Debido a que las conchas de ostión (COs) no son biodegradables, se acumulan por toneladas en basureros municipales y predios urbanos afectando directamente al medio ambiente y a la salud pública [4]. Uno de los problemas importantes que se generan con la acumulación excesiva de COs, es que, debido a su forma cóncava, almacenan agua de lluvia en ellas y favorecen la reproducción de mosquitos, ayudando a la proliferación de enfermedades como el Dengue y Chikungunya, poniendo en riesgo la salud de la población [3]. Otro de los problemas que se genera con la falta de reciclaje de la COs está relacionado con la descomposición de los restos orgánicos remanentes en las conchas, ya que se genera mal olor al descomponerse lo que a su vez atrae a fauna nociva como ratas, moscas y otros insectos. El reciclado de la COs es un tema importante en el estado de Tabasco, y debe involucrar al gobierno, así como a la sociedad en general.

Por otro lado, el cemento Portland es el principal insumo de construcción a nivel mundial [5], lo que lo convierte, sin ninguna duda, en un material muy importante en el desarrollo de la sociedad moderna; lamentablemente en su producción se generan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2), [6], lo que impacta negativamente al medio ambiente. En la nueva ingeniería de la construcción se tiene el compromiso de producir materiales de calidad, a bajos costos y duraderos, pero siempre tomando en cuenta la sustentabilidad del medio ambiente. Como parte de este compromiso, se han desarrollado alternativas sustentables al uso del cemento Portland. Una de estas alternativas son los biocementos [7]. Dentro de los biocementos más prometedores están aquellos producidos a partir de la concha de ostión calcinada y triturada [8]. Estudios previos han

CC BY NC SA
Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

evaluado el uso de concha de ostión calcinada como sustituto parcial del cemento, reportando que porcentajes cercanos al 10 % permiten incorporar este residuo sin afectar de forma importante la trabajabilidad de las mezclas [9 y 10].

En la actualidad los biocementos se utilizan como sustituto parcial del cemento Portland comercial [11]. Un aspecto importante que no ha sido atendido debidamente en el desarrollo de estas tecnologías ha sido el efecto de los biocementos en el tiempo de fraguado de las mezclas cemento-biocemento. Debido a que el tiempo de fraguado es el período que tarda una mezcla en pasar de un estado plástico (trabajable) a un estado rígido o endurecido, el tiempo de fraguado es un aspecto clave en el diseño, la planificación y la ejecución de proyectos de construcción exitosos. Por tanto, en esta investigación se analizan los cambios en los tiempos de fraguado de mezclas de cemento Portland comercial y biocemento generado a partir de conchas de ostión "*Crassostrea virginica*" procedentes del estado de Tabasco, México. El objetivo de este documento es contribuir en la caracterización de los biocementos procedentes de la concha de ostión, incentivar el uso de este tipo de biocemento y al mismo tiempo, ayudar al medio ambiente reduciendo el consumo de cemento comercial y la acumulación excesiva de conchas de ostión en vertederos.

METODOLOGÍA

Enfoque y método de investigación. Esta investigación tuvo un enfoque experimental y cuantitativo, ya que se realizaron pruebas de laboratorio para observar cómo influye el biocemento de concha de ostión en el tiempo de fraguado de pastas de cemento. Se analizaron seis mezclas diferentes: una mezcla de control (solo cemento Portland) y cinco mezclas con 10 % de sustitución de cemento por biocemento calcinado a diferentes temperaturas (150, 300, 500, 750 y 900 °C). Todas las mezclas se prepararon con las mismas condiciones de fluidez. Los tiempos de fraguado se midieron siguiendo la norma ASTM C191 [12]. Adicionalmente, y con el objetivo de complementar el análisis del comportamiento del biocemento se determinó la resistencia a compresión simple a los 28 días de curado por inmersión en agua para todas las mezclas. Estas pruebas se realizaron en tres cubos de pasta de cemento de 5 cm por lado, preparados y ensayados según el procedimiento descrito en la norma ASTM C109 [13].

Instrumentos de recolección de datos. Para recolectar los datos del tiempo de fraguado se utilizó el aparato de Vicat, el cual permite medir de forma precisa el momento en que la pasta empieza a endurecer (fraguado inicial) y cuando alcanza una rigidez mayor (fraguado final). También se utilizó un cronómetro, una regla metálica, una espátula, un molde troncocónico, una placa de vidrio y una mezcladora de mortero.

Para la prueba de resistencia a compresión simple se utilizaron moldes cúbicos de bronce de 5 cm, una prensa hidráulica eléctrica con capacidad de 120 toneladas de la marca DAVI, una regla para verificar las dimensiones, y un recipiente de curado con agua a temperatura controlada.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

También se utilizó un termómetro digital de lectura directa para registrar la temperatura de la pasta durante el ensayo de fraguado. La medición se realizó de forma puntual en cada intervalo de lectura de la aguja de Vicat.

Justificación de variables y número de muestras. La variable independiente en este estudio fue la temperatura de calcinación del biocemento (150, 300, 500, 750 y 900 °C), mientras que la variable dependiente fue el tiempo de fraguado inicial y final de la mezcla. El porcentaje de sustitución del cemento se mantuvo constante en 10 % en peso, ya que estudios anteriores han demostrado que este porcentaje es efectivo y no compromete la manejabilidad de la mezcla [9 y 10]. Para cada tipo de pasta se elaboraron tres muestras independientes, tanto para la medición de los tiempos de fraguado como para la resistencia a compresión simple. Esto permitió calcular promedios y desviaciones estándar para cada ensayo. Adicionalmente, para los resultados de compresión simple se determinó el rango relativo.

Recolección de concha de Ostión. Se recolectaron conchas de ostión (COs) en distintas zonas de Paraíso, Tabasco (**Figura. 1**), tales como: Puerto Ceiba (18.41374, -93.17925), El Bellote (18.42562, -93.14961) y Chiltepec (18.42733, -93.11204) [14].

Finalizada la recolección, las conchas se trasladaron a las instalaciones del laboratorio de materiales de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA), de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).



Figura 1. Ubicación de las zonas de recolección en Paraíso, Tabasco, México [14].

Limpieza de la Cos. Posterior a la recolección, se inició con la limpieza de la concha de ostión con cepillo y agua corriente, sin uso de jabón o solventes, para remover contaminantes que podrían estar adheridos, como restos orgánicos, carbón, suelo, o sal (**Figura. 2**).

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630



Figura 2. Limpieza de COs.

Calcinado, triturado y tamizado de la Cos. El siguiente paso fue separar cinco distintas porciones de aproximadamente 1 kilogramo de COs. Cada porción se calcinó por separado a una única temperatura: 150 °C, 300 °C, 500 °C, 750 °C y 900 °C. Para el calcinado a 150 °C se utilizó un horno de la marca DAVI (**Figura. 3A**), ubicado en el Laboratorio de materiales de la DAIA, mientras que para alcanzar las temperaturas mayores se utilizó un horno Thermo Scientific Lindberg Blue M, el cual está ubicado en el Centro de Investigación de Ciencia y Tecnología Aplicada de Tabasco (CICTAT), en el campus Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (**Figura. 3B**).

En todos los casos, la rampa de calentamiento y enfriamiento fue de 10 °C/min, con un tiempo de permanencia de 3 horas a la temperatura objetivo. El proceso se realizó en atmósfera de aire. Después del calcinado, las muestras se almacenaron en recipientes cerrados para reducir su exposición a la humedad ambiental y al CO_2.

Una vez finalizado el calcinado de cada grupo de COs, se utilizó un mortero de porcelana para triturar a cada grupo de conchas calcinadas hasta que el material fuese capaz de pasar la malla ASTM número 100 (abertura de 0.150 mm) (**Figura. 3D**).

Como resultado de todo el proceso antes descrito, se obtuvieron cinco tipos de concha triturada, las cuales recibieron el nombre de biocementos: BC-150, BC-300, BC-500, BC-750 y BC-900.

Determinación del tiempo de fraguado. Para la determinación de la influencia de los biocementos en el tiempo de fraguado de las pastas de cemento, primero se elaboró una pasta solo de cemento comercial (500 g), la cual funcionó como muestra de control. Posteriormente, se elaboraron

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

pastas por separado para cada uno de los biocementos, en estas pastas el cemento comercial fue sustituido en un 10 % en peso por cada biocemento. Es decir, cada pasta con biocemento poseía 450 g de cemento comercial y 50 g de un tipo de biocemento.

El fraguado es un proceso químico mediante el cual, como resultado de su reacción con el agua, el cemento pasa de un estado plástico a uno sólido [15]. Hay dos tipos de fraguado, el inicial y final. El fraguado inicial es el tiempo que transcurre desde el primer contacto del cemento con el agua, hasta que la pasta comienza a endurecerse. Mientras que, el fraguado final es el tiempo que transcurre desde que termina el fraguado inicial hasta que se presenta un endurecimiento apreciable. Para la determinación de los tiempos de fraguado se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM C191 [12]. El equipo necesario está compuesto por el aparato de Vicat, aguja de 1 mm de diámetro, molde troncocónico, cronómetro y placa cuadrada de vidrio de 100 mm (**Figura. 4**).



Figura 3. Proceso de preparación del biocemento a partir de concha de ostión: (A) calcinado en horno de laboratorio; (B) calcinado en horno industrial; (C) trituración manual; (D) tamizado del material.

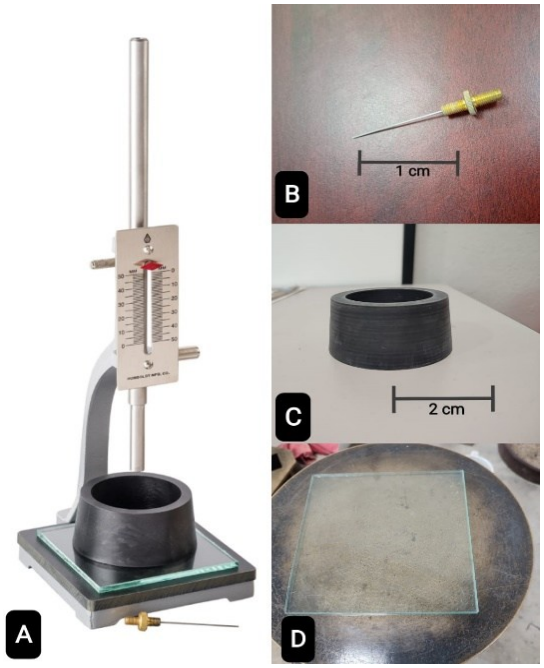


Figura 4. Componentes del equipo utilizado para el ensayo de fraguado con el aparato de Vicat: (A) aparato de Vicat; (B) aguja de Vicat; (C) molde troncocónico; (D) placa de vidrio.

Para la determinación del tiempo de fraguado a todas las mezclas se les proporcionó el agua suficiente para alcanzar la misma fluidez de 170 ± 5 mm. La fluidez, también conocida como trabajabilidad, es la capacidad que tiene una mezcla de cemento para ser fácilmente manejada y

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

colocada. Este parámetro está directamente relacionado con la cantidad de agua presente en la pasta, por lo que funciona como un buen indicador de su consistencia. Su determinación se realiza conforme a lo establecido en la norma ASTM C1437 [16].

Debido a que todas las pastas se ajustaron a una fluidez de 170 ± 5 mm, la cantidad de agua utilizada varió entre mezclas. Por ello, en la **Tabla 1** se muestra el agua total empleada y la relación agua/cemento de cada pasta.

Tabla 1. Dosificación de las pastas y relación agua/cemento.

Mezcla	Cemento (g)	Bio cemento (g)	Agua (g)	Relación a/c
Control	500	0	190	0.380
P-150	450	50	198	0.440
P-300	450	50	201	0.447
P-500	450	50	195	0.433
P-750	450	50	192	0.427
P-900	450	50	191	0.424

El mayor consumo de agua se presentó para las mezclas P-150, P-300 y P-500. A partir de P-750, la cantidad de agua disminuyó y se acercó al valor de la pasta de control. Este comportamiento sugiere que los biocementos calcinados a menor temperatura son poco reactivos, comportándose como un polvo requiriendo más agua para lubricar las partículas, mientras que, a mayor temperatura, aumenta su reactividad y su comportamiento se vuelve más cercano al del cemento Portland.

Una vez que las pastas de cemento alcanzaron la fluidez necesaria se introdujeron por la parte inferior del molde llenándolo por completo, seguidamente se colocó una placa cuadrada de vidrio en la base del molde y se procedió a enrazar la parte superior (**Figura. 5A**).

Posteriormente, la muestra se colocó en una cámara de humedad constante (95 ± 5 %) dejándola reposar antes de tomar las lecturas correspondientes con la aguja de Vicat. La primera lectura se tomó 15 minutos después del primer contacto del cemento con el agua. La determinación del tiempo de fraguado consiste en introducir la aguja de Vicat (2.5 cm de longitud) totalmente en la pasta de cemento cada 15 minutos y registrar el tiempo en el que la pasta comienza a oponerse al avance de la aguja.

Esta oposición se registra mediante una regleta de graduación que el equipo de Vicat posee. El ensayo termina cuando la aguja de Vicat no puede penetrar más de 0.5 mm en la pasta.

Adicionalmente, en cada lectura realizada con la aguja de Vicat se midió la temperatura de la pasta, utilizando un termómetro digital insertado en una muestra gemela (extraída de la misma mezcla, con igual relación agua/cemento y condiciones). Aunque la norma ASTM C191 [12] no

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

requiere esta medición, se consideró importante realizarla ya que la temperatura influye directamente en la velocidad de hidratación del cemento y, por lo tanto, en los tiempos de fraguado.

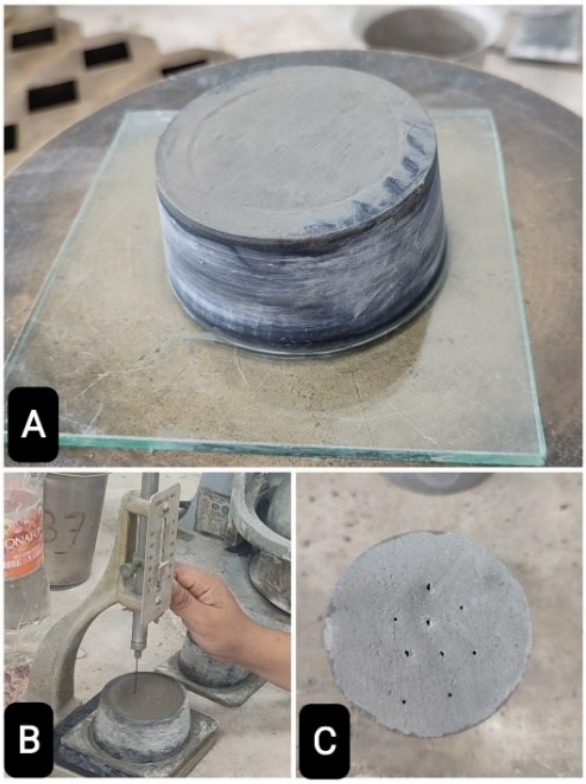


FIGURA 5. (A) pasta de cemento colocada en el molde troncocónico; (B) aplicación del aparato de Vicat en la toma de lecturas; (C) estado de la pasta de cemento después del ensayo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al promedio aritmético de tres muestras independientes. La desviación estándar fue representada mediante barras de error en cada gráfica. En el caso de los ensayos de compresión simple, se muestran en los gráficos los valores del rango relativo, calculado conforme a la norma ASTM C109 [13], lo cual permitió evaluar la uniformidad entre probetas. Dicha norma establece que el rango no debe superar el 8.7 % del promedio. Estos parámetros refuerzan la confiabilidad de los resultados al comparar el desempeño de las pastas con biocemento frente a la mezcla de control.

En las **Figuras 6**, **7** y **8** se muestran respectivamente, los cambios en el tiempo de fraguado inicial y final de las pastas de cemento (junto con la temperatura máxima registrada durante cada ensayo) así como los resultados de los ensayos a compresión simple. En general se observa que, con respecto a la pasta de control, en todas las pastas con biocemento se registró un aumento en ambos tiempos de fraguado. Este aumento del tiempo de fraguado se acompañó con una

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

disminución de la temperatura máxima de la pasta. En ambos tiempos de fraguado se observó que los biocementos calcinados a menor temperatura mostraban mayor tiempo de fraguado y menor temperatura durante este proceso. De esta manera, se observó que, con respecto al control, cuando se añadió biocemento calcinado a 150 °C, los fraguados inicial y final aumentaron 26 y 31 minutos, respectivamente; y su temperatura disminuyó alrededor de un 11 %.

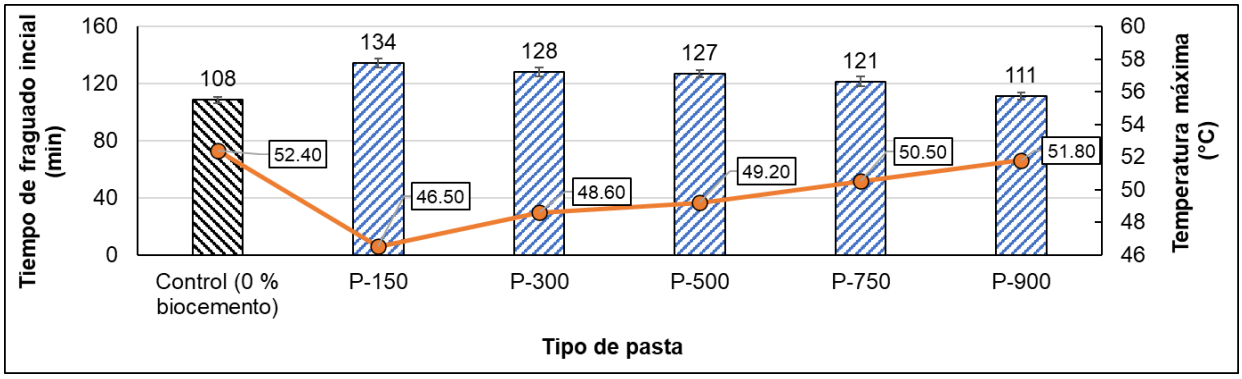


FIGURA 6. Tiempos de fraguado inicial y temperatura máxima de las pastas durante el ensayo.

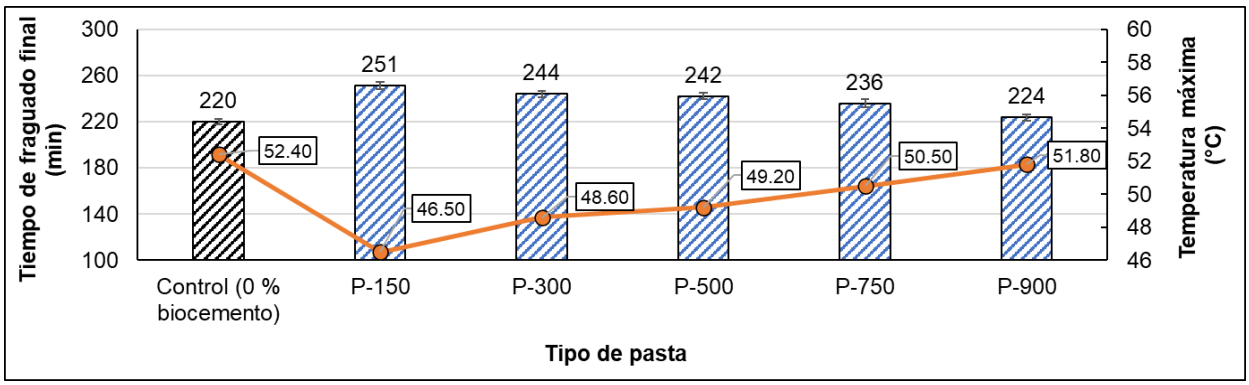


FIGURA 7. Tiempos de fraguado final y temperatura máxima de las pastas durante el ensayo.

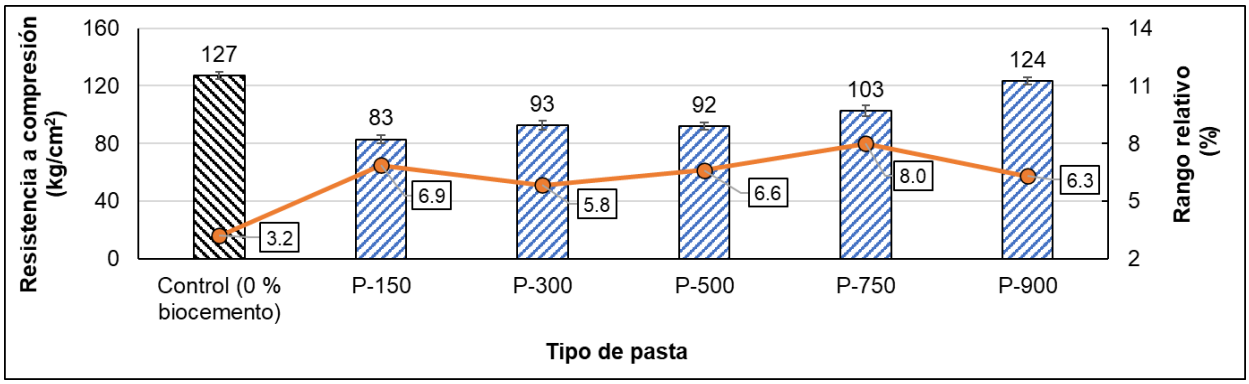


FIGURA 8. Resistencias a la compresión simple y rango relativo de las pastas.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

A medida que la temperatura de calcinación se aumentó, los tiempos de fraguado se fueron reduciendo y la mezcla se calentó más. La pasta con biocemento calcinado a 900 °C (P-900) fue la que mostró los tiempos de fraguado más cercanos a la muestra de control. Esto sugiere que el biocemento poco calcinado tiene baja reactividad, por lo que enfría a la mezcla y retrasa el fraguado.

Los resultados muestran que en las pastas con biocemento calcinado a temperaturas ≥ 750 °C se libera calor de manera similar a la pasta de control (≈ 51 °C), y los tiempos de fraguado se acercan a los exhibidos por el cemento convencional. En investigaciones previas realizadas en el estado de Tabasco con las conchas de ostión, se demostró que las temperaturas de calcinado a partir de 750 °C empiezan a generar compuestos de óxido de calcio [4, 10 y 17], el cual es uno de los principales componentes del cemento Portland comercial. Aunque en el presente estudio no se realizó caracterización mineralógica propia mediante DRX o FTIR, estos antecedentes permiten interpretar los resultados obtenidos de manera consistente con la literatura. Un ejemplo de estas investigaciones fue la realizada por Ramón-de los Santos et al. [4], quienes analizaron y reportaron un difractograma de muestras de conchas de ostión calcinadas a diferentes temperaturas. En este estudio se observa que las muestras calcinadas a 900 °C exhiben una conversión casi total del carbonato de calcio en óxido de calcio, lo que podría explicar la mayor reactividad observada en la pasta P-900.

La similitud entre las pastas P-750 y P-900 en los tiempos de fraguado y en la temperatura máxima no implica que ambas presenten el mismo grado de conversión mineralógica. De acuerdo con la literatura citada, la formación de óxido de calcio puede iniciar desde temperaturas cercanas a 750 °C, mientras que una conversión más completa del carbonato de calcio se reporta alrededor de 900 °C. Por esto, es posible que el biocemento calcinado a 750 °C ya genere una respuesta térmica y de fraguado cercana a la pasta de control, aunque el material calcinado a 900 °C presente una condición más favorable, como también se refleja en la resistencia a compresión.

En lo que se refiere a la resistencia a la compresión simple, se observó que para las pastas elaboradas con biocemento calcinado a 150 °C, se registró un descenso de alrededor de 35 % con respecto a la pasta de control. A medida que la temperatura de calcinado fue aumentando, se registró un aumento de la resistencia. La pasta con una resistencia muy similar a la pasta de cemento convencional fue aquella elaborada con biocemento calcinado a 900 °C, lo que corrobora su alta reactividad. Además, este resultado coincide con los tiempos de fraguado y la temperatura máxima registrados, que fueron comparables a los de la mezcla de control.

Este comportamiento sugiere que pastas con fraguado más lento tienden a alcanzar menores resistencias, esto debido a una hidratación menos activa durante las primeras horas. En la **Figura 8** se observa que el valor del rango relativo no supera el 8.7 % establecido por la norma ASTM C109 [13], lo cual indica una buena uniformidad entre probetas del mismo tipo y respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

Desde el punto de vista de los tiempos de fraguado, los resultados obtenidos indican que es viable sustituir (en un 10 % en peso) cemento por concha de ostión calcinada a 900 °C. En esta condición, los tiempos de fraguado inicial y final fueron muy similares a los de la mezcla de control, lo que indica que no se afecta significativamente el proceso de endurecimiento del material. El tiempo de fraguado es un criterio válido para evaluar esta viabilidad, ya que define el momento en el que la mezcla deja de ser trabajable y comienza su transición hacia un material estructural. Mantener estos tiempos dentro de rangos aceptables garantiza que el uso de biocemento no altere los procedimientos constructivos habituales.

En conjunto, estos resultados muestran que al aumentar la temperatura de calcinación del biocemento disminuyen los tiempos de fraguado, aumenta la temperatura máxima de la pasta y mejora la resistencia a compresión, acercándose al comportamiento de la pasta de control.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que el uso de biocemento elaborado a partir de concha de ostión calcinada influye de manera importante en los tiempos de fraguado de pastas de cemento. Se observó que las pastas con biocemento calcinado a baja temperatura (150 °C) presentaron tiempos de fraguado inicial y final considerablemente mayores que la pasta de control, lo que indica una baja reactividad del material para esas condiciones de calcinado. Lo anterior se reflejó directamente en la resistencia a la compresión simple, observándose una reducción del 35 %.

En particular, la pasta elaborada con biocemento calcinado a 900 °C fue la que mostró un comportamiento más cercano al del cemento convencional. Sus tiempos de fraguado inicial y final, así como su temperatura máxima durante el ensayo, fueron comparables a los de la mezcla de control. Además, esta pasta alcanzó una resistencia a la compresión similar a la pasta de control, lo que sugiere una mayor reactividad del material calcinado a esta temperatura y su potencial como sustituto viable en aplicaciones prácticas.

Por lo tanto, desde el punto de vista del tiempo de fraguado, el biocemento de concha de ostión puede emplearse como sustituto parcial del cemento Portland, siempre que se controle adecuadamente su temperatura de calcinación y el porcentaje de sustitución. Además, esta alternativa representa una opción sustentable para el aprovechamiento de residuos marinos, contribuyendo a reducir la acumulación de conchas y el impacto ambiental asociado a la producción de cemento convencional.

Finalmente, los resultados obtenidos con el biocemento calcinado a 900 °C sugieren que en estudios posteriores podría evaluarse el efecto de temperaturas de calcinación mayores, cercanas a 1000 °C, para analizar su influencia en la reactividad del material y en su desempeño en pastas de cemento.

CC BY NC SA

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

REFERENCIAS

[1] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, "Ostión, recurso importante para miles de pescadores en México," 2022. [En línea]. Disponible:https://www.gob.mx/conapesca/prensa/ostion-recurso-importante-para-miles-de-pescadores-en-mexico?idiom=es-MX[Consultado: 19-ene-2025].

[2] Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca,"Ostión," 2022. [En línea]. Disponible: https://campotabasco.gob.mx/?pesquero=ostion[Consultado: 19-ene-2025].

[3] R. S. Mora-Ortiz, E. Del Angel-Meraz, A. Díaz-S., E. Munguía-Balvanera, F. Magaña-Hernández,J. Alavez-Ramírez, M. A. Pantoja-Castro y J. del R. Torres-Hernández, "The use of pre-wetting to improve the mechanical behavior of masonry mortar elaborated with crushed oyster shell,," Sustainability vol. 16, no. 1, p. 199, 2023.

[4] C. Ramón-de los Santos, A. S. López Rodríguez, P. Sifuentes Gallardo, M. Á. Hernández Rivera, J. G. F. Rivera Trejo y L. L. Díaz Flores, "Reuse of Crassostrea virginica oyster shells to obtain a mortar binder from their milling and calcination," Rev. Espacio I+D Innov. Más Desarro., vol. 5, no. 12, pp. 38–48, 2016.

[5] B. A. Tayeh, M. W. Hasaniyah, A. M. Zeyad y M. O. Yusuf,"Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review,"J. Clean. Prod., vol. 237, Art. no. 117723, 2019.

[6] N. Mahasenan, S. Smith y K. Humphreys,"The cement industry and global climate change: Current and potential future cement industry CO_2 emissions," en Greenhouse Gas Control Technologies: 6th International Conference, pp. 995–1000, 2003.

[7] Y. Yang, J. Chu, L. Cheng y H. Liu,"Utilization of carbide sludge and urine for sustainable biocement production," J. Environ. Chem. Eng., vol. 10, no. 3, Art. no. 107443, 2022.

[8] G. L. Yoon, B. T. Kim, B. O. Kim y S. H. Han,"Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell," Waste Manag., vol. 23, no. 9, pp. 825–834, 2003.

[9] H. N. Ruslan, K. Muthusamy, S. M. Syed Mohsin, R. Jose y R. Omar, "Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review," Mater. Today, Proc., vol. 48, pp. 713–719, 2022.

[10] J. R. Jiménez Bautista y K. J. R. Mora, Elaboración de mortero con biocemento a base de conchas de ostión calcinadas. Cunduacán, Tabasco, México: División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 2025.

[11] Moblaje,"El biocemento y las construcciones autorreparables," 2025. [En línea]. Disponible: https://moblaje.mx/category/industria/blog/biocemento-y-construcciones-autorreparables [Consultado: 19-ene-2025].

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

[12] ASTM C191-21, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021.

[13] ASTM C109/C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, PA, SA: ASTM International, 2021.

[14] Google Maps, "Ubicación geográfica del área de estudio," 2025. [En línea]. Disponible: https://www.google.com/maps/ [Consultado: 01-feb-2025].

[15] F. Pérez, "¿Qué son los fraguados y para qué sirven en construcción?, "Cementos Torices, 2025. [En línea]. Disponible: https://cementostorices.com/blog/construccion/fraguados/ [Consultado: 22-feb-2025].

[16] ASTM C1437-20, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2020.

[17] C. Ramón-de los Santos, J. G. F. Rivera Trejo, A. S. López Rodríguez, M. Á. Hernández Rivera, P. Sifuentes Gallardo y L. L. Díaz Flores, "Effect of the thermal annealing on the phase transitions of biogenic $CaCO_3$ nanostructures," J. Mex. Chem. Soc., vol. 63, no. 1, 2019.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6630

Estudio teórico de un captador solar de aire con y sin material de cambio de fase

Theoretical study of an air solar collector with and without phase change material

Álvarez-Alor B.[1*], Cruz-Valdez J. A. [2], Montalvo D. [3], López-Santos F.[1], Alvarado-Méndez P. E.[4] Zetina-Ríos I. I. [5].

[1] División de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[2] División de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[3] División de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[4] División de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[5] División de Ingeniería en Semiconductores, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[a] Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5 Col. Reserva Territorial.
* balvareza@itesco.edu.mx

Artículo Científico
Publicado:15 de diciembre 2026

RESUMEN

En la presente investigación se realizó un estudio de la transferencia de calor a un captador solar de aire de dos canales (CSA-2C) con y sin material de cambio de fase (PCM) en la placa absorbedora. El captador se estudió utilizando la técnica de balances globales de energía en una dimensión (1-D) y en estado transitorio. El estudio paramétrico consistió en la modelación numérica del CSA-2C para el día más frío y más cálido de cada mes del año 2022 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Adicionalmente, se consideró el captador sin PCM y se probaron 4 diferentes PCM en la placa absorbedora con espesores de 0.01 m y 0.025 m. Se desarrolló un código numérico en C el cual consiste en una serie de subrutinas que resuelven el modelo matemático obtenido de la técnica de balances globales de energía. Finalmente, del estudio paramétrico se encontró que la mejor configuración fue el CSA-2C con PCM Rubitherm RT28 con 25 mm de espesor, el cual puede suministrar hasta 13 horas de confort térmico, tiene un tiempo de recuperación de la inversión inicial de 18 años y evita emitir al ambiente hasta 420 kg de CO_2 al año, reduciendo los gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Captador solar de aire; Eficiencia térmica; Estudio paramétrico; Material de cambio de fase; Modelo numérico transitorio.

ABSTRACT

This research presents a study of heat transfer in a two-channel air-source solar collector (SAC-2C) with and without phase-change material (PCM) on the absorber plate. The collector was analyzed using one-dimensional (1-D) global energy balances under transient conditions. The parametric study involved numerical modeling of the CSA-2C for the coldest and warmest days of each month in 2022 in Cuernavaca, Morelos, Mexico. Additionally, the collector was tested without PCM, and four different PCMs with thicknesses of 0.01 m and 0.025 m were applied to the absorber plate. A numerical code was developed in C, consisting of a series of subroutines that

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

solve the mathematical model obtained from the global energy balance technique. Finally, the parametric study found that the best configuration was the CSA-2C with PCM Rubitherm RT28 with a thickness of 25 mm, which can provide up to 13 hours of thermal comfort, has a payback period of 18 years and avoids emitting up to 420 kg of CO2 per year into the environment, reducing greenhouse gases.

Keywords: Parametric study; Phase change material; Solar air collector; Transient numerical model; Thermal efficiency

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de energías renovables, como la solar, aplicada al diseño de captadores solares, contribuye al ahorro y uso eficiente de energía en aplicaciones como el secado de productos y semillas agrícolas, la climatización de edificaciones y la generación eléctrica [1]. Los captadores solares de aire (CSA) son dispositivos diseñados para transferir la energía solar incidente a un fluido de trabajo (aire), que se emplea con distintos fines [2].

Actualmente, se han desarrollado estudios teórico-experimentales en estado transitorio para mejorar su eficiencia térmica, utilizando la técnica de Balances Globales de Energía (GEB) [1,3-11]. Una de las principales limitaciones de los captadores solares convencionales es la dependencia directa de la disponibilidad de radiación solar. Para reducir este efecto, se ha estudiado la incorporación de PCM como sistemas de almacenamiento de energía térmica. Estos materiales permiten almacenar una cantidad considerable de energía mediante calor latente durante el proceso de fusión y liberarla posteriormente durante la solidificación [11–16]. Su aplicación en captadores solares puede favorecer una mayor continuidad en el suministro de energía térmica durante los periodos de baja radiación solar [13,15].

El modelado del proceso de cambio de fase representa un desafío debido a la interacción entre la transferencia de calor sensible y latente, así como a la evolución de la interfaz sólido-líquido [17–20]. En trabajos previos se ha demostrado la utilidad de los modelos transitorios para analizar el comportamiento térmico de captadores solares de dos canales [1,3]. Particularmente, Álvarez et al. [21] analizaron teóricamente la incorporación de PCM en un captador solar de aire de dos canales, evaluando diferentes materiales y espesores. A partir de la revisión de la literatura, el presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento térmico de un CSA-2C en estado transitorio, con y sin PCM en la placa absorbedora, bajo las condiciones climáticas de Cuernavaca, Morelos.

MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

En este apartado se muestran el modelo físico representativos del caso de estudio, así como los modelos matemáticos en estado transitorio para el CSA-2C con material de cambio de fase que se deben resolver para obtener los perfiles de temperatura.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

Modelo físico. Un captador solar de aire está definido como una clase especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante solar en calor [2]. En general, un captador solar convencional está compuesto por una estructura que sostiene un absorbedor, una cubierta y un aislamiento en la parte trasera. En condiciones normales de operación un captador solar de aire recibe radiación solar en la cubierta superior, una parte de ´esta energía se pierde debido a diversas causas como lo son: la reflexión y absorción de la cubierta superior, convección forzada provocada por la velocidad del viento, convección y radiación entre la cubierta de vidrio y la placa absorbedora, etc., y la otra parte de dicha energía es transferida al fluido de trabajo [2]. Por lo tanto, al lograr que la mayor parte de la energía, proveniente de la radiación solar, sea transferida al fluido provocará un incremento en la eficiencia térmica del captador.

En la **Figura 1** se muestra el diagrama esquemático del CSA-2C con PCM en la placa absorbedora. En particular, se muestran las temperaturas de cada uno de los elementos analizados (T_i), el espesor de cada uno de los materiales (H_{yi}) y los flujos de calor por conducción, convección o radiación ($q_{cond,conv\ o\ rad}$). El dispositivo está formado por una cubierta de vidrio, una placa absorbedora, una capa de PCM, una segunda placa absorbedora, una superficie inferior, una capa de triplay, una capa de material aislante y una placa de metal. El fluido de transferencia de calor (aire) es impulsado mediante convección forzada a través del canal 1 y 2 (f_1 y f_2). Además, se muestra un acercamiento al PCM que se ubica entre las dos placas absorbedoras. Se observa que este elemento se seccionará en $N_{y,PCM}$ elementos.

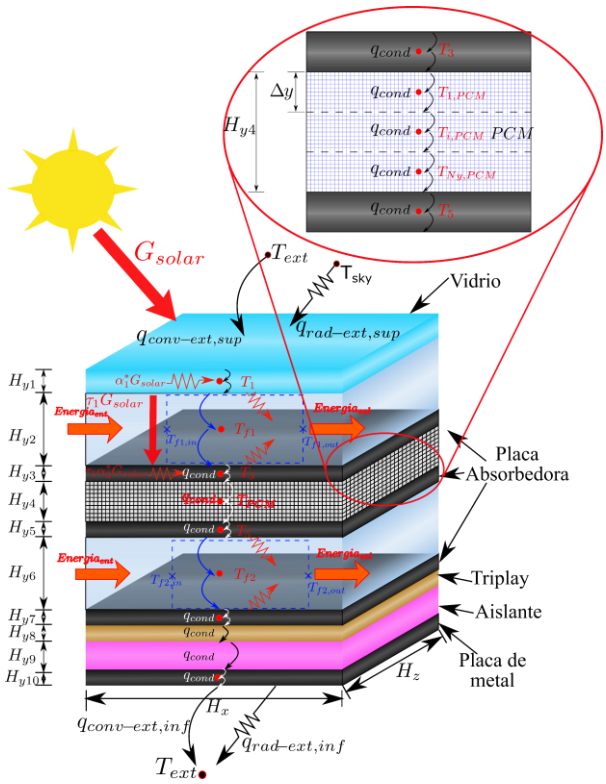


Figura 1. Modelo físico del CSA-2C con PCM en la placa absorbedora

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

Modelo matemático. Para el desarrollo del modelo matemático se utilizó la técnica de balances globales de energía en estado transitorio, Ec. (1), se utiliza la metodología presentada y validada en [3]. Los términos transitorios se discretizaron utilizando el método completamente implícito, realizando una diferencia regresiva como se explica en [1]. Se utilizó el método del Calo especifico efectivo (*Cp-efectivo*) para analizar el fenómeno de transferencia de calor por conducción en el PCM.

$$q_{entra,1} - q_{sale,1} = \frac{d}{dt}(\rho_1 Cp, 1T_1)AH_{y1} \qquad (1)$$

En la Ec. (2) se muestra la matriz tridiagonal que modela el comportamiento térmico del CSA-2c en estado transitorio y con PCM en la placa absorbedora.

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & -a_1a_2a_4 & -a_1a_2a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & A_{2,2} & -b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1c_3 & -c_2c_3 & A_{33} & -c_1c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & A_{4,4} & -d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & A_{5,5} & -e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_2 & A_{6,6} & -f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_2g_3 & A_{7,7} & -g_1g_3 & -g_1g_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -p_2 & A_{8,8} & -p_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_1r_3 & -r_2r_3 & A_{9,9} & -r_1r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -s_2 & A_{10,10} \end{bmatrix}$$

- $\begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_3 \\ T_{1,PCM} \\ T_{iPCM} \\ T_{Ny,PCM} \\ T_5 \\ T_{f2} \\ T_7 \\ T_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_{4,1} \\ B_{4,i} \\ B_{4,Ny} \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \end{bmatrix}$

Donde,

$$\begin{aligned}
A_{11} &= a_1a_2a_3 + a_1a_2a_4 + a_2a_3a_4 \\
&\quad + a_1a_2a_3a_4a^0_{p,1} \\
A_{2,2} &= b_1 + b_2 + \tfrac{b_1b_2b_3}{\gamma} + b_1b_2a^0_{p,f1} \\
A_{3,3} &= c_1c_2 + c_1c_3 + c_2c_3 \\
&\quad + c_1c_2c_3a^0_{p,3} \\
A_{4,4} &= d_1 + d_2 + d_1d_2a^0_{p,1,PCM} \\
A_{5,5} &= e_1 + e_2 + e_1e_2a^0_{p,i,PCM} \\
A_{6,6} &= f_1 + f_2 + f_1f_2a^0_{p,Ny,PCM} \\
A_{7,7} &= g_1g_2 + g_1g_3 + g_2g_3 \\
&\quad + g_1g_2g_3a^0_{p,5} \\
A_{8,8} &= p_1 + p_2 + \tfrac{p_1p_2p_3}{\gamma} + p_1p_2a^0_{p,f2} \\
A_{9,9} &= r_1r_2 + r_1r_3 + r_2r_3 \\
&\quad + r_1r_2r_3a^0_{p,7} \\
A_{10,10} &= s_1 + s_2 + s_1s2a^0_{p,8}
\end{aligned} \qquad (2)$$

$$\begin{aligned}
B_1 &= a_2a_3a_4T_{ext} + a_1a_3a_4T_{sky} \\
&\quad + a_1a_2a_3a_4\alpha^*_1G_{solar} \\
&\quad + a_1a_2a_3a_4a^0_{p,1}T^0_1 \\
B_2 &= \tfrac{b_1b_2b_3}{\gamma}T_{f1,in} + b_1b_2a^0_{p,f1}T^0_{f1} \\
B_3 &= c_1c_2c_3\tau^*_1\alpha^*_3G_{solar} \\
&\quad + c_1c_2c_3a^0_{p,3}T^0_3 \\
B_{4,1} &= d_1d_2a^0_{p,1,PCM}T^0_{1,PCM} \\
B_{4,i} &= e_1e_2a^0_{p,i,PCM}T^0_{i,PCM} \\
B_{4,Ny} &= f_1f_2a^0_{p,Ny,PCM}T^0_{Ny,PCM} \\
B_5 &= g_1g_2g_3a^0_{p,5}T^0_5 \\
B_6 &= \tfrac{p_1p_2p_3}{\gamma}T_{f2,in} + p_1p_2a^0_{p,f2}T^0_{f2} \\
B_7 &= r_1r_2r_3a^0_{p,7}T^0_7 \\
B_8 &= s_1T_{ext} + s_1s2a^0_{p,8}T^0_8
\end{aligned}$$

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

Los coeficientes $(a_i,\ b_i,\ etc.)$ mostrados en la matriz corresponden a resistencias conductivas, convectivas y/o radiativas, que tienen la siguiente estructura:

$$h_{conv} + \frac{H_{yi}}{2\lambda_i}, \qquad \frac{H_{yi}}{2\lambda_i} + \frac{\Delta_{yi,PCM}}{2\lambda_{yi,PCM}}, \qquad \frac{1}{h_{rad}}$$

Los coeficientes de transferencia de calor asociados a estas ecuaciones se calculan en cada instante de tiempo con la temperatura media de los distintos elementos utilizando las correlaciones empíricas que se presentan en [3].

Se utilizó el método del *Cp-efectivo* para modelar el comportamiento del PCM. En donde, se contempla que el término de la entalpía de cambio de fase forma parte del término Cp en cada ecuación resultante. La implementación del método del Cp-efectivo para modelar el comportamiento térmico del PCM ha sido ampliamente utilizado en la literatura [14,19-21].

$$C_{p-efectivo} = \begin{cases} C_{p,sol} & T < T_{sol} \\ \frac{C_{p,sol}+C_{p,liq}}{2} + \frac{h_{ls}}{\Delta T} & T_{sol} \leq T \leq T_{liq} \\ C_{p,liq} & T > T_liq \end{cases}$$

En la **Tabla 1** se muestran las propiedades y sus equivalencias de acuerdo con los posibles escenarios durante la transferencia de calor por conducción.

Tabla 1. Propiedades del sistema para cada fase

Sólido si $T < T_{sol}$
$\rho(i,j) = \rho_{sol}$
$\lambda(i,j) = \lambda_{sol}$
$C_{p,efectivo}(i,j) = C_{p,sol}$
Mezcla si $T_{sol} \leq T \leq T_{liq}$
$\rho(i,j) = \frac{\rho_{sol} + \rho_{liq}}{2}$
$\lambda(i,j) = \frac{\lambda_{sol} + \lambda_{liq}}{2}$
$C_{p,efectivo}(i,j) = \frac{C_{p,sol} + C_{p,liq}}{2} + \frac{h_{ls}}{\Delta T}$
Líquido si $T > T_{liq}$
$\rho(i,j) = \rho_{liq}$
$\lambda(i,j) = \lambda_{liq}$
$C_{p,efectivo}(i,j) = C_{p,liq}$

Nota: Recuperado de [21]

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

RESULTADOS

El estudio paramétrico consistió en la evaluación del CSA-2C con y sin PCM en la placa absorbedora. En cuanto al estudio paramétrico, se estableció como condición de referencia la configuración del CSA-2C sin incorporación de PCM en la placa absorbedora como un dispositivo de control para comparar los resultados obtenidos por el CSA-2C con PCM. Se evaluó el comportamiento térmico de cuatro PCM diferentes y se consideraron 2 espesores en el PCM (10mm y 25mm), las propiedades y nombres de estos se muestra en la **Tabla 2**. En la columna 5 de la Tabla 2, se muestra el intervalo de temperatura de cambio de fase (T_{pc}). En este sentido, el PCM se comporta como sólido abajo del límite inferior, como líquido sobre el límite superior y se comporta como mezcla (parte líquida y parte sólida) en el intervalo presentado. El nombre comercial de los PCM estudiados es el valor promedio de dicho intervalo

Tabla 2. Propiedades de los PCM

PCM	λ $\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg°C}}\right)$	C_p $\left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg°}C}\right)$	ρ $\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$	T_{pc} $(°C)$	h $\left(\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}\right)$
RT 18 HC	0.20	2×10^3	880-770	17-19	260
RT 25 HC	0.20	2×10^3	880-770	22-26	230
RT 28 HC	0.20	2×10^3	880-770	27-29	250
RT 34 HC	0.20	2×10^3	880-770	34-36	240

Nota: Recuperado de [21]

En la **Figura 2** se muestran los perfiles de temperatura de los distintos elementos para el CSA-2C con un espesor de 25 mm de PCM RT-28. En particular, se muestra la temperatura promedio de la cubierta de vidrio de color cian, de negro la placa absorbedora 1, de gris el PCM, de rojo la placa absorbedora 2, de naranja la placa absorbedora 3 y de café la superficie inferior del CSA. Además, se muestra la temperatura de salida del aire del canal 1 y 2 de color verde y azul, respectivamente. De igual forma, se presenta de color rosa la temperatura ambiente, con una línea punteada de color rojo la radiación solar incidente en el captador y de color verde claro la fracción liquida promedio del PCM. Finalmente, se muestra con una franja azul la temperatura de confort para el día y clima analizado.

En la **Figura 2** se observa que la implementación del PCM logra prolongar el tiempo de operación del CSA-2C después de la puesta del sol. Se observa que la temperatura de los distintos elementos se incrementa en hasta 6°C en los periodos donde no existe radiación solar. A diferencia de la configuración sin PCM en la que la temperatura de los distintos elementos es igual a la temperatura ambiente cuando no existe radiación. Además, se observa que el PCM logró fundirse y solidificarse

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

completamente en un día de operación. La implementación del PCM permitió incrementar el periodo de permanencia dentro del rango de confort térmico.

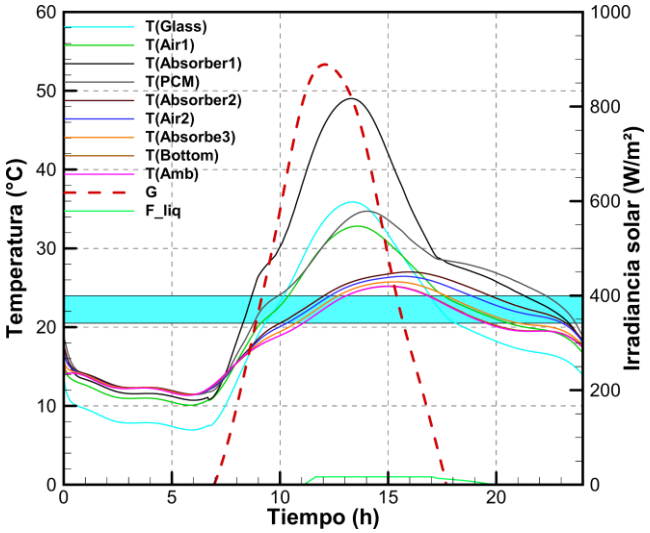


Figura 2. Perfiles de temperatura del CSA-2c con RT-28 y 25mm de espesor, 14 de enero.

En la **Figura 3** se muestra las horas de confort térmico que pueden suministrar las diferentes configuraciones estudiadas para los días más fríos de cada mes. Análogamente, en la **Figura** 4 se muestran las horas de confort térmico de las distintas configuraciones para los días más cálidos de cada mes. Se observa que la configuración sin PCM puede suministrar desde 1.5 hasta 5 horas de confort. Mientras que el RT28 con 25 mm de espesor es la mejor configuración para este tipo de clima tanto para los días fríos como los días cálidos, dado que puede suministrar hasta 12.5 horas de confort térmico. Otra configuración que presentó buenos resultados fue el RT25 con 25 mm de espesor que obtuvo hasta 11 horas de confort térmico. Las demás configuraciones de PCM lograron producir desde 4.5 hasta 9 horas de confort térmico.

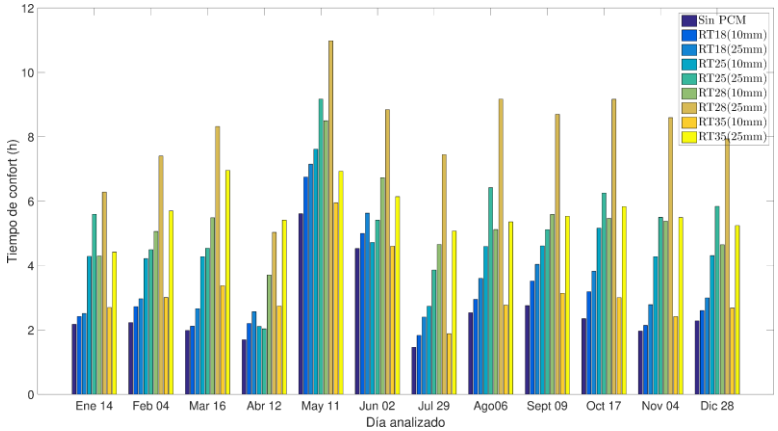


Figura 3 Horas de confort para el CSA-2C sin y con PCM (Días más fríos de cada mes)

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

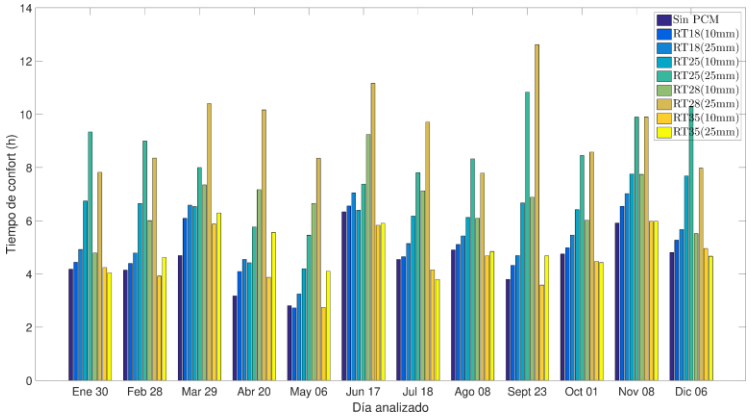


Figura 4 Horas de confort para el CSA-2C sin y con PCM (Días más cálidos de cada mes)

Los resultados obtenidos muestran que la configuración con RT28 y 25 mm de espesor presentó el mejor comportamiento térmico para las condiciones climáticas de Cuernavaca. Este resultado puede atribuirse principalmente a la combinación entre la temperatura de cambio de fase del RT28 y su capacidad de almacenamiento de energía. El espesor de 25 mm permite incorporar una mayor cantidad de material de cambio de fase respecto a una capa de 10 mm, incrementando la masa disponible para almacenar energía en forma de calor sensible y, principalmente, de calor latente durante el proceso de fusión. Aunque un mayor espesor puede incrementar la resistencia a la transferencia de calor dentro del PCM, en este caso el incremento de la capacidad de almacenamiento compensó dicho efecto.

La temperatura de fusión del RT28 resulta adecuada para las temperaturas alcanzadas por la placa absorbedora durante la operación del captador. Esto permite que una parte importante de la energía solar absorbida sea almacenada durante los periodos de mayor radiación, evitando un incremento excesivo de la temperatura de la placa. Posteriormente, cuando la radiación solar disminuye, el PCM inicia su solidificación y libera gradualmente la energía almacenada hacia la placa y el flujo de aire.

Por lo tanto, el mejor desempeño del RT28 de 25 mm no se relaciona únicamente con alcanzar una mayor temperatura, sino con su capacidad para almacenar una mayor cantidad de energía y prolongar la entrega de calor al aire durante los periodos de menor radiación solar. En las condiciones analizadas, esta configuración representa un equilibrio favorable entre capacidad de almacenamiento, temperatura de cambio de fase y transferencia de calor.

Finalmente, se realizó un análisis de la inversión inicial, considerando un tiempo de vida útil del PCM de 27.4 años. Para este estudio se consideró los costos de construcción del CSA-2C con y sin PCM. Se encontró que el CSA-2C sin PCM tiene un costo aproximado de $7,800.00 MXN. Mientras que la configuración con PCM tiene un costo aproximado de $32,000.00 MXN y $65,000.00MXN para la configuración de 10 mm y 25 mm de espesor, respectivamente. Para calcular el tiempo de retorno se parte de la premisa que el CSA-2C suplirá la carga térmica de un calentador eléctrico con el 100% de la eficiencia. Se aplicó la regla del trapecio para encontrar la

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

energía total entregada por el dispositivo y se consideró que el mes se comporta con la mitad de día fríos y la mitad de días cálidos. Para el análisis de la inversión inicial se utilizó la metodología presentada por Alvarez *et al.* [5] se consideró la inflación en el calculo del retorno de la inversión inicial, para ello se utilizó la Ec. (3).

$$\begin{aligned} CTR_i &= CTR_{i-1} + GAM \cdot Inflation \\ &\quad + GEV \cdot Inflation \\ &\quad - CEA \cdot Inflation \end{aligned} \qquad (3)$$

Del estudió se encontró que para la ciudad de Cuernavaca se tendría un periodo de recuperación de 18 años donde el CSA-2C con RT-28 y 25 mm de espesor sería totalmente autosustentable generando ahorros sustanciales a los usuarios. Posteriormente, se realizó un estudió del impacto ambiental que tendría la implementación de la tecnología presentada. Para ello se implementó la formula presentada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), la cual establece que el factor de emisión para el año 2024 se puede calcular mediante la Ec. (4).

$$1\text{kWh} = 0.438\text{kg}\,CO_2 \qquad (4)$$

En la **Figura 5** se muestra la cantidad en kg de $C0_2$ que se dejan emitir al ambiente cada año para cada una de las configuraciones. Se encontró que el utilizar este tipo de energía para la climatización pasiva de edificaciones puede dejar de emitir hasta 400 kilogramos de CO_2 anualmente por cada m^2 de instalación.

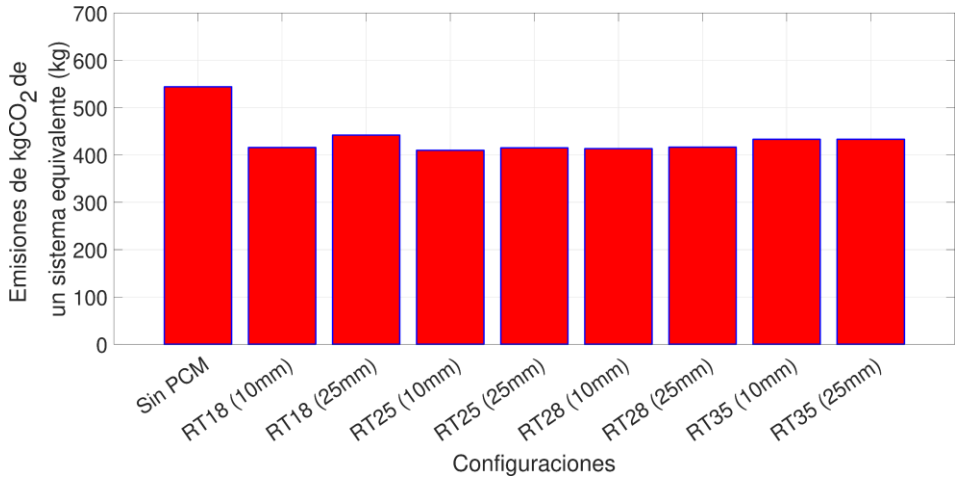


Figura 5 Emisiones equivalentes de kg de CO_2 para las diferentes configuraciones del CSA-2C en Cuernavaca

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

CONCLUSIONES

En la presente investigación se muestra la viabilidad para implementar un CSA-2C utilizando un material de cambio de fase en la placa absorbedora sujeto a las condiciones meteorológicas de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, México. Entre los principals hallazgos de la investigación se encuentran los siguientes:

- Implementar la tecnología PCM provoca un decremento de hasta de 10% en la eficiencia térmica del CSA-2C sin PCM. Sin embargo, los PCM logran prolongar hasta 10 horas el tiempo de operación del CSA-2C.
- La mejor configuración para el clima de Cuernavaca, Morelos es el Rubitherm RT-28 con 25 mm de espesor. El cual puede suministrar hasta 12 horas de confort térmico.
- El tiempo de recuperación del CSA-2C con RT-28 y 25 mm de espesor es de 18 años. Considerando que la vida útil del PCM es de 27.4 año, la implementación de la tecnología PCM para la climatización pasiva de edificaciones se convierte en una alternativa viable.
- Implementar un CSA-2C con o sin PCM en la placa absorbedora puede disminuir las emisiones de CO2 hasta en 550 kg cada año por cada m2 de instalación.

RECOMENDACIONES

Con la finalidad de dar continuidad y contribuir a la mejora de esta línea de investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Realizar una evaluación térmica con otras condiciones meteorológicas características de la República Mexicana.
2. Utilizar otros PCM que tengan mayor capacidad de almacenamiento de energía.
3. Implementar la tecnología PCM en un prototipo experimental para validad los resultados obtenidos por el Código numérico.
4. Realizar un estudio teórico implementando la técnica de volumen finito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Superior de Coatzacoalcos (ITESCO) por el soporte institucional proporcionado.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

REFERENCIAS

[1] B. Álvarez, J. Arce y D. Colorado,"Transient study (annual) of the heat transfer of a two-channel solar air collector," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 146, no. 1, Art. no. 011005, 2024.

[2] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman y A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer,6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.

[3] B. Álvarez, J. Arce, Y. Chávez y L. Lira, "Theoretical and experimental study of heat transfer in a two-channel flat plate solar air collector," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 147, no. 2, Art. no. 021005, 2025.

[4] C. M. Vivek, "Review of flat plate solar collectors and solar energy utilization in India," Int. J. Sci. Res. Rev.,vol. 8, no. 2, pp. 4391–4405, 2019.

[5] T. T. Zhu, Y. H. Diao, Y. H. Zhao, C. Ma, T. Y. Wang y J. Liu,"A comparative investigation of two types of MHPA flat-plate solar air collector based on exergy analysis," ASME J. Sol. Energy Eng.,vol. 139, no. 5, Art. no. 051011, 2017.

[6] P. Pal y R. Dev,"Thermal modeling, experimental validation, and comparative analysis of modified solar stills," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 141, no. 6, Art. no. 061013, 2019.

[7] J. M. Afaq,"Thermal evaluation of a double-pass unglazed solar air heater with perforated plate and wire mesh layers," Sustainability, vol. 12, no. 9, p. 3619, 2020.

[8] R. Garay, B. Arregi, I. Gomis, P. Bonnamy, S. Raji y J. Lopez, "Performance assessment of an unglazed solar thermal collector for envelope retrofitting," Energy Procedia,vol. 115, pp. 361–368, 2017.

[9] E. Mahmoud y A. Ahmed,"Energy and exergy analysis of a thermosiphon and forced-circulation flat-plate solar collector using MWCNT/water nanofluid," Case Stud. Therm. Eng., vol. 14, Art. no. 100416, 2019.

[10] Z. Liu, Y. Liu, D. Wu, G. Jin, H. Yu y W. Ma,"Performance and feasibility study of solar-air source pump systems for low-energy residential buildings in alpine region," J. Clean. Prod., vol. 256, Art. no. 120735, 2020.

[11] A. D. Tuncer, A. Amini y A. Khanlar, "Experimental and transient CFD analysis of parallel-flow solar air collectors with paraffin-filled recyclable aluminum cans as latent heat energy storage unit," J. Energy Storage, vol. 770, Art.no. 108009, 2023.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

[12] A. M. Fadhil, J. M. Jalil y G. A. Bilal, "Experimental and numerical investigation of solar air collector with phase change material in column obstruction," J. Energy Storage,vol. 79, Art. no. 110066, 2024.

[13] Z. Badiei, M. Eslami y K. Jafarpur,"Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling," Energy, vol. 192, Art. no. 116719, 2020.

[14] M. Abuşka, S. Şevik y A. Kayapunar, "Experimental analysis of solar air collector with PCM-honeycomb combination under natural convection," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 195, pp. 299–308, 2019.

[15] A. K. Raj, M. Srinivas y S. Jayaraj,"Transient CFD analysis of macro-encapsulated latent heat thermal energy storage containers incorporated within solar air heater," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 156, Art. no. 119896, 2020.

[16] M. Abuşka, S. Şevik y A. Kayapunar, "A comparative investigation of the effect of honeycomb core on the latent heat storage with PCM in solar air heater," Appl. Therm. Eng.,vol. 148, pp. 684–693, 2019.

[17] H. Yang y Y. He,"Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods,"Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 37, pp. 385–392, 2010.

[18] B. Zivkovic y I. Fuji, "An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers," Energy Build., vol. 70, pp. 51–61, 2001.

[19] L. Klimeš, P. Charvát y M. Ostry, "Challenges in the computer modelling of phase change materials," Mater. Tehnol., vol. 46, pp. 335–338, 2012.

[20] P. Charvát, L. Klimeš y M. Ostry, "Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems," Energy Build., vol. 68, pp. 488–497, 2014.

[21] B. Álvarez, J. Arce, F. López-Santos, J. A. Cruz, D. Montalvo, D. Colorado-Garrido y L. G. Carreto-Hernandez, "Theoretical study of heat transfer in a two-channel flat-plate air solar collector with and without phase change material," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 148, no. 3, 2026.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707