

Revista Científica

VIDA NATURAL

Universidad Autónoma de Chiriquí
Vol. 3 No. 2, enero - junio, 2026
ISSN L2992-6424



UNACHI
Hombre y cultura para el porvenir

Universidad Autónoma de Chiriquí

Ciudad Universitaria, David, Chiriquí
República de Panamá
REVISTAS.UNACHI.AC.PA

AUTORIDADES

Rectora

Mgtr. Etelvina de Bonagas

Vicerrector Académico

Mgtr. Jorge Bonilla

Vicerrector de Investigación y Posgrado

Dr. Pedro González

Vicerrectora Administrativa

Dra. Rosa Moreno

Vicerrectora de Asuntos Estudiantiles

Dra. Olda Cano

Vicerrector de Extensión

Dr. Jorge López

Secretaría General

Dra. Enis Grajales

REVISTA CIENTÍFICA VIDA NATURAL

Jefe Editorial

Dra. Diana Carolina Gómez González

Universidad Autónoma de Chiriquí, Panamá

Comité Editorial

Dr. Eyvar E. Rodríguez Quiel

Universidad Autónoma de Chiriquí, Panamá

Dra. Edilia de la Rosa Manzano

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Dra. Soizic Gibeaux

Université de Bretagne Sud, Francia

Dr. Alonso Santos Murgas

Facultad de Ciencias Naturales y Exactas

Universidad de Panamá, Panamá

Comité Científico

Dra. Cecilia Prada

Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Dr. Leonardo Arellano

Universidad Autónoma de Tamaulipas, México

Dr. Jhonny Correa

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Ficha Técnica:

Páginas: 110

Diseño y diagramación: **Lcdo. Tomás Herrera**

Programador de HTML y EPUB: **Mgtr. Danny Murillo**

Volumen 3 Número 2

Publicación Digital

revista.vidanatural@unachi.ac.pa

Foto de portada

Lcdo. Jorge Castillo

2026

Contenido

Evaluación espacial multitemporal de manglares en Panamá entre 1996 y 2020: Cobertura, permanencia y conservación basada en datos de Global Mangrove Watch.	1 - 20
Preliminary laboratory assessment for lignocellulosic biomass drying.	21 - 34
Integración de materiales sostenibles en la construcción civil ante el cambio climático.	35 - 54
Generación de aromas y sabores en alimentos: una revisión de sus principales rutas metabólicas.	55 - 90
Compuestos químicos y actividad biológica de <i>Plectranthus amboinicus</i> (Lour.) Spreng: una revision.	91 - 110



Evaluación Espacial Multitemporal de Manglares en Panamá entre 1996 y 2020: Cobertura, Permanencia y Conservación basada en Datos de Global Mangrove Watch

Multitemporal Spatial Assessment of Mangroves in Panama between 1996 and 2020: Coverage, Persistence, and Conservation Based on Global Mangrove Watch Data

Carla De León

<https://orcid.org/0009-0000-9007-6233>

Alexander Rosas

<https://orcid.org/0009-0008-0610-1300>

Universidad de Panamá, Licenciatura en Biología orientación Biología Vegetal, Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología

Autor correspondiente: carlavm.deleon-c@up.ac.pa

Enviado: 9 de noviembre de 2025. **Aceptado:** 15 de diciembre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i2.1116>

Resumen

Este estudio analiza los cambios en la cobertura de manglares en la República de Panamá durante los años 1996 y 2020, mediante un enfoque biogeográfico basado en análisis espacial multitemporal. Se delimitaron trece zonas costeras representativas a lo largo de ambas vertientes (Pacífico y Caribe), y se evaluaron los porcentajes de ganancia, pérdida y permanencia de manglar utilizando datos del *Global Mangrove Watch* y herramientas SIG. Los resultados revelan que, en la mayoría de las zonas, más del 90 % de la cobertura de manglar se ha mantenido, lo que sugiere una notable estabilidad ecológica a escala nacional. Sin embargo, se identificaron focos de pérdida significativa en zonas como Bahía de San Miguel (Darién), El Archipiélago de Bocas del Toro (Bahía de Almirante) y la costa de Colón. A partir de registros georreferenciados de especies obtenidos en GBIF, se evaluó además la presencia de especies vegetales amenazadas según la Lista Roja de la UICN, destacando la importancia de zonas con alta permanencia como refugios ecológicos prioritarios. Los hallazgos refuerzan la necesidad de establecer estrategias regionales diferenciadas de conservación y manejo adaptativo, al tiempo que posicionan a Panamá como un país que, a pesar de ciertas presiones, aún mantiene una cobertura significativa de manglares en el contexto global.

Palabras clave

Análisis espacial, cambio de cobertura, conservación, manglares, Panamá.

Abstract

This study analyzes changes in mangrove coverage in the Republic of Panama between 1996 and 2020, using a biogeographic approach based on multitemporal spatial analysis. Thirteen representative coastal zones were delineated along both the Pacific and Caribbean coasts, and percentages of mangrove gain, loss, and permanence were evaluated using *Global Mangrove Watch* data and GIS tools. The results reveal that in most zones, over 90 % of mangrove coverage has been maintained, suggesting notable ecological stability at the national level. However, significant loss hotspots were identified in areas such as Bahía de San Miguel (Darién), Bahía de Almirante (Bocas del Toro), and the coast of Colón. Using georeferenced species occurrence records from GBIF, the presence of threatened plant species (according to the IUCN Red List) was assessed, highlighting the importance of zones with high permanence as priority ecological refuges. The findings underscore the need for regionally differentiated conservation and adaptive management strategies, while also positioning Panama as a country that, despite certain pressures, still retains significant mangrove coverage in the global context.

Keywords

Conservation, land cover change, mangroves, spatial analysis, Panama.

Introducción

Los manglares constituyen ecosistemas costeros de transición que se desarrollan en ambientes tropicales y subtropicales, donde convergen diversos factores marinos, fluviales y terrestres, lo cual da lugar a comunidades vegetales altamente especializadas, dominadas por especies halófitas adaptadas tanto a la salinidad como al anegamiento. Desde una perspectiva biogeográfica, estos ecosistemas no solo actúan como puentes ecológicos, sino que también funcionan como refugios costeros para múltiples taxones y como zonas núcleo de biodiversidad dentro de los grandes corredores tropicales (Méndez y Estrada, 2024). En América Latina, los manglares ocupan una franja irregular pero estratégica que se extiende desde México hasta el sur de Brasil en el Atlántico, y desde Colombia hasta Perú en el Pacífico, incluyendo el Caribe insular. En este contexto, Panamá, por su ubicación en el istmo centroamericano, representa un nodo clave para el análisis de los patrones de distribución

de estas comunidades vegetales, ya que actúa simultáneamente como puente y filtro biogeográfico para especies de flora y fauna costera (Junk et al., 2013).

De acuerdo con el análisis de Junk et al. 2013, los manglares destacan no solo por su elevada productividad y su capacidad de almacenamiento de carbono, sino también por su papel fundamental en la protección contra eventos extremos, como oleajes, tormentas y marejadas. Asimismo, constituyen viveros esenciales para especies pesqueras de valor comercial y hábitats clave para numerosos organismos acuáticos y terrestres. No obstante, estos ecosistemas se encuentran actualmente bajo múltiples amenazas, entre las que se incluyen la expansión urbana descontrolada, el turismo de gran escala, la deforestación por tala indiscriminada, la instalación de estanques para acuicultura y, de manera creciente, los efectos del cambio climático global.

En el caso de Panamá, dichas amenazas se han documentado claramente en zonas como la Bahía de Chame, donde estudios recientes han evidenciado transformaciones aceleradas en la estructura y funcionalidad del manglar como consecuencia de actividades antrópicas, incluyendo la construcción de infraestructura urbana y turística, así como la sobreexplotación de sus recursos naturales (Méndez y Estrada, 2024).

Ante este panorama, herramientas como la plataforma *Global Mangrove Watch* han resultado fundamentales para el monitoreo multitemporal de los cambios en la cobertura de manglares, permitiendo detectar tanto pérdidas como ganancias de vegetación con alta precisión (Bunting et al., 2018). Sin embargo, el análisis meramente cuantitativo no es suficiente, por lo que se hace necesario incorporar enfoques biogeográficos que permitan interpretar la dinámica espacial de estos ecosistemas, identificar patrones regionales y, especialmente, localizar aquellas zonas donde la cobertura se ha mantenido estable, ya que podrían constituir refugios ecológicos para especies amenazadas o vulnerables, según criterios establecidos por la Lista Roja de la UICN (UICN, 2024).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar los patrones espaciales de cambio de cobertura de manglares en Panamá entre 1996 y 2020, mediante la

delimitación de zonas representativas a lo largo de las costas del Caribe y del Pacífico. A partir del análisis de datos satelitales, registros de distribución de especies y evaluación del estado de conservación, se pretende ofrecer una lectura integral sobre la transformación del manglar panameño y las especies que lo conforman, con implicaciones directas para su conservación.

El período de análisis comprendido entre 1996 y 2020 fue seleccionado debido a la disponibilidad y consistencia de los datos de cobertura de manglar a escala nacional. El año 1996 representa una de las primeras líneas base confiables para el monitoreo espacial de manglares en Panamá, previa a la intensificación de las presiones antrópicas en zonas costeras, mientras que 2020 corresponde al año más reciente con información consolidada, comparable y disponible. Este intervalo temporal permite identificar tendencias acumuladas de pérdida, ganancia y permanencia del manglar a lo largo de más de dos décadas, aportando una perspectiva integral sobre la dinámica espacial de este ecosistema en Panamá.

El objetivo general de este estudio fue analizar la distribución y los cambios espaciales en la cobertura de manglares en Panamá entre 1996 y 2020 mediante la delimitación de zonas ecológicas, identificando patrones de pérdida, ganancia y permanencia, y evaluando su potencial como refugios para especies que conforman el manglar panameño.

Materiales y Métodos

Este estudio se desarrolló con base en un enfoque de análisis espacial multitemporal, orientado a evaluar los cambios en la cobertura de manglares en la República de Panamá durante el período comprendido entre 1996 y 2020. La metodología se organizó en tres fases: recopilación de datos, análisis geoespacial e interpretación biogeográfica.

Recopilación de datos: Se descargaron las capas de cobertura de manglares disponibles en la plataforma Global Mangrove Watch (GMW), correspondientes a los años 1996 y 2020. Estos productos cartográficos se generan a partir de la integración de sensores de radar y

ópticos, principalmente ALOS PALSAR y Landsat, y presentan una resolución espacial aproximada de 25 m. Diversos estudios han reportado una alta confiabilidad del producto GMW para el análisis de cobertura de manglar, con precisiones globales superiores al 90 % (Bunting et al., 2018).

Estas capas fueron utilizadas como base para identificar zonas de pérdida, ganancia y permanencia del manglar en el territorio nacional. Posteriormente, se recopilieron datos de distribución geográfica de especies del manglar panameño desde el portal Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org), incluyendo registros de *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus*, entre otras. Para cada especie, se verificó su categoría de amenaza mediante la Lista Roja de la UICN (2024), con el fin de integrar una perspectiva de conservación en el análisis biogeográfico.

Análisis geoespacial: Se delimitaron trece zonas de análisis distribuidas a lo largo de las costas del Caribe y el Pacífico, las cuales fueron digitalizadas como polígonos (figura 1). La delimitación se realizó a partir de la distribución espacial de la cobertura de manglar observada en los mapas del Global Mangrove Watch, seleccionándose aquellas áreas que concentraban las mayores extensiones continuas de manglar en el territorio panameño. Estas zonas representan los principales núcleos del ecosistema de manglar en el país y permitieron evaluar de forma comparativa los patrones de la cobertura entre ambas vertientes.

El análisis de cambio de cobertura se realizó en formato ráster. Las capas de manglar correspondientes a 1996 y 2020 fueron reclasificadas en valores binarios (1 = manglar, 0 = no manglar) y estandarizadas a una resolución espacial de 25 m. La permanencia del manglar se identificó mediante una operación lógica AND entre ambas capas, mientras que la pérdida y la ganancia se determinaron a partir de las diferencias espaciales entre los mapas binarios, utilizando herramientas de álgebra de mapas en ArcGIS Pro. Todas las capas ráster y vectoriales fueron reproyectadas al sistema de referencia WGS84 (UTM zona 17N). En el caso de los datos ráster, la reproyección se realizó mediante el método *nearest*

neighbor, con el fin de preservar los valores originales de clasificación y evitar reasignaciones durante el procesamiento espacial.

Además, se integraron los puntos georreferenciados de las especies vegetales, los cuales se superpusieron sobre las zonas previamente analizadas (figura 3) para identificar coincidencias entre áreas de alta permanencia de manglar y registros de especies en categorías de amenaza, con el objetivo de localizar posibles refugios ecológicos. Si bien el análisis espacial se ejecutó en ArcGIS Pro, los mapas ilustrativos que acompañan este artículo fueron elaborados en QGIS 3.36, empleando como insumos las capas previamente procesadas.

Finalmente, se incorporaron elementos cartográficos de referencia, incluyendo líneas de costa, divisiones político-administrativas y límites de áreas protegidas, obtenidos a partir de fuentes oficiales como GADM, Natural Earth y el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) (CATHALAC, 2007).

Cálculo porcentual de cambios de cobertura: Para cuantificar la transformación del manglar en cada una de las trece zonas, se calcularon los porcentajes de pérdida, ganancia y permanencia de cobertura vegetal mediante las siguientes expresiones:

- Pérdida (%) = $\frac{(\text{Área manglar 1996} - \text{Área intersección 1996-2020})}{\text{Área manglar 1996}} \times 100$
- Ganancia (%) = $\frac{(\text{Área manglar 2020} - \text{Área intersección 1996-2020})}{\text{Área manglar 2020}} \times 100$
- Permanencia (%) = $\frac{(\text{Área intersección 1996-2020})}{(\text{Área manglar 1996})} \times 100$

Donde el área de intersección corresponde al polígono común entre las coberturas de manglar de 1996 y 2020, es decir, la superficie que se mantuvo cubierta de manglar durante todo el periodo de estudio. Estas métricas permitieron caracterizar de forma precisa el comportamiento dinámico de cada zona, facilitando el análisis comparativo entre regiones

y la identificación de fragmentos estables del ecosistema. Los cálculos anteriores siguen fórmulas ampliamente utilizadas en estudios de cambio de cobertura y uso del suelo (Singh, 1989), y fueron adaptadas para el contexto de los manglares conforme a los criterios de monitoreo implementados por el *Global Mangrove Watch* (Bunting et al., 2018)

Es importante señalar que los análisis de cobertura de manglar pueden estar sujetos a fuentes de incertidumbre asociadas a la presencia de nubes, diferencias entre sensores, variaciones mareales y procesos automáticos de clasificación. En ecosistemas de manglar, la dinámica intermareal puede influir en la delimitación del borde del bosque, particularmente en zonas de transición entre manglar y áreas inundables. No obstante, el uso de productos del Global Mangrove Watch, basados en múltiples escenas y sensores de radar, reduce significativamente el efecto de la nubosidad y la variabilidad mareal, permitiendo una evaluación consistente de los patrones de cambio a escala regional y nacional. Estas fuentes de incertidumbre fueron consideradas en la interpretación de los resultados.

Resultados

El análisis multitemporal de la cobertura de manglares en las trece zonas delimitadas a lo largo de las costas Pacífica y Caribeña de Panamá permitió identificar patrones diferenciados de transformación del paisaje vegetal costero entre 1996 y 2020 (figura 1). En la tabla 1 se presenta el resumen de los porcentajes de ganancia, pérdida y permanencia en cada zona, junto con su respectiva área total.

En términos generales, se observó una alta proporción de permanencia de cobertura de manglar en la mayoría de las regiones, con valores superiores al 92 % en todas las zonas analizadas (figura 4). Destacan particularmente la Zona 3 Bahía Honda y Mariato (Veraguas) con un 95.25 % de permanencia, así como la Zona 1 Charco Azul y Barú (Chiriquí) con un 95.05 %, lo cual sugiere una relativa estabilidad estructural del ecosistema en estos sectores.

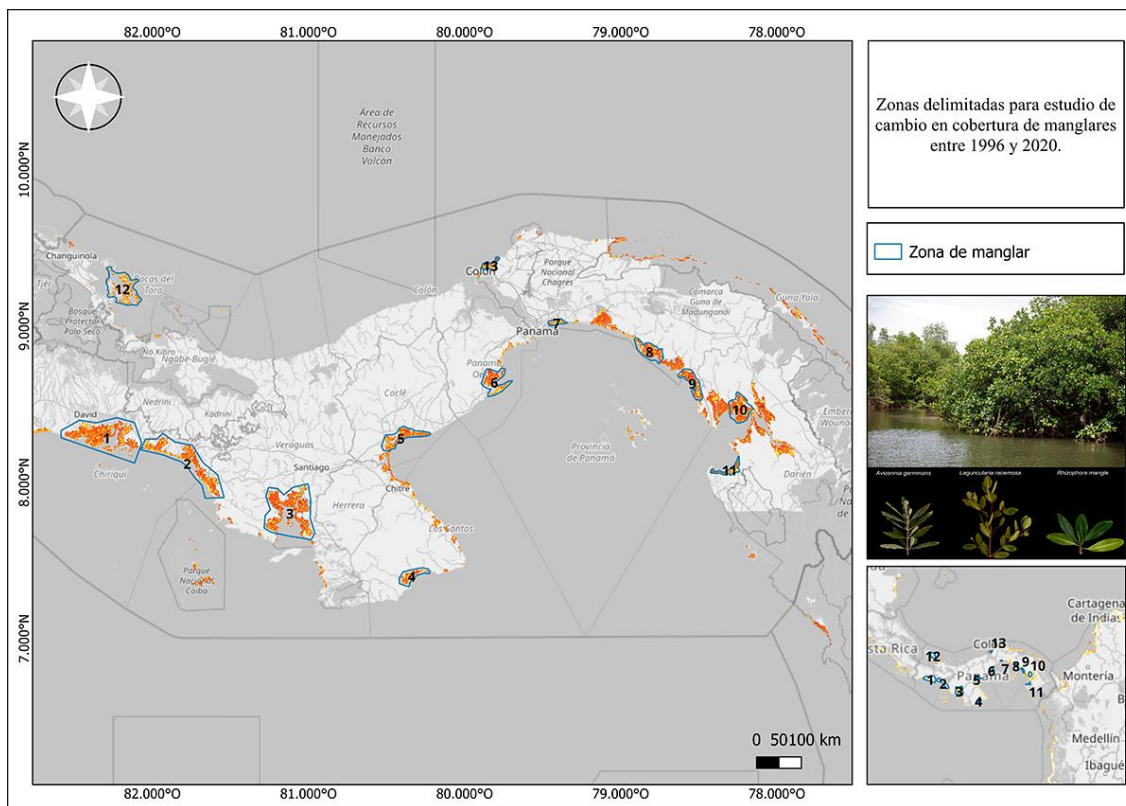


Figura 1. Zonas delimitadas para el estudio de cambio en cobertura de manglares entre 1996 y 2020. Se muestran los 13 polígonos costeros usados como unidades de análisis, junto a la cobertura de manglares de 1996 y 2020. Elaboración propia Qgis.

Por el contrario, las zonas con mayor porcentaje de pérdida de cobertura fueron la Zona 13 Costa de Colón y Cativá (Colón) con 6.97 %, seguida por la Zona 12, Archipiélago de Bocas del Toro con 6.61 %, y la Zona 11 Delta del Tuira y Jaqué (Darién) con 6.20 % (figura 2). Estas cifras indican un mayor nivel de alteración, posiblemente asociado a presiones antrópicas específicas como el desarrollo urbano, expansión portuaria o actividades extractivas (Méndez y Estrada, 2024).

En cuanto a la ganancia de cobertura, los porcentajes fueron generalmente bajos, fluctuando entre 0.61 % y 2.50 %. La mayor ganancia se registró en la Zona 5, Aguadulce y Antón (Coclé), mientras que la Zona 13, Costa de Colón y Cativá (Colón) presentó el valor más bajo. Si bien estos aumentos pueden estar asociados a procesos de regeneración

natural o reforestación, también podrían corresponder a variaciones detectadas por el sensor o a ocupación transitoria por vegetación secundaria.

Finalmente, si bien las zonas con mayor superficie de manglar como la Zona 1, Charco Azul y Barú y la Zona 3, Bahía Honda y Mariato concentran las mayores cantidades absolutas de manglar conservado, también se evidencian zonas más pequeñas como la Zona 4, Tonosí y Cambutal (Los Santos) donde las proporciones relativas de pérdida son significativamente elevadas, lo cual podría representar una mayor vulnerabilidad ecológica en términos de fragmentación y presión sobre las especies presentes (figura 2).

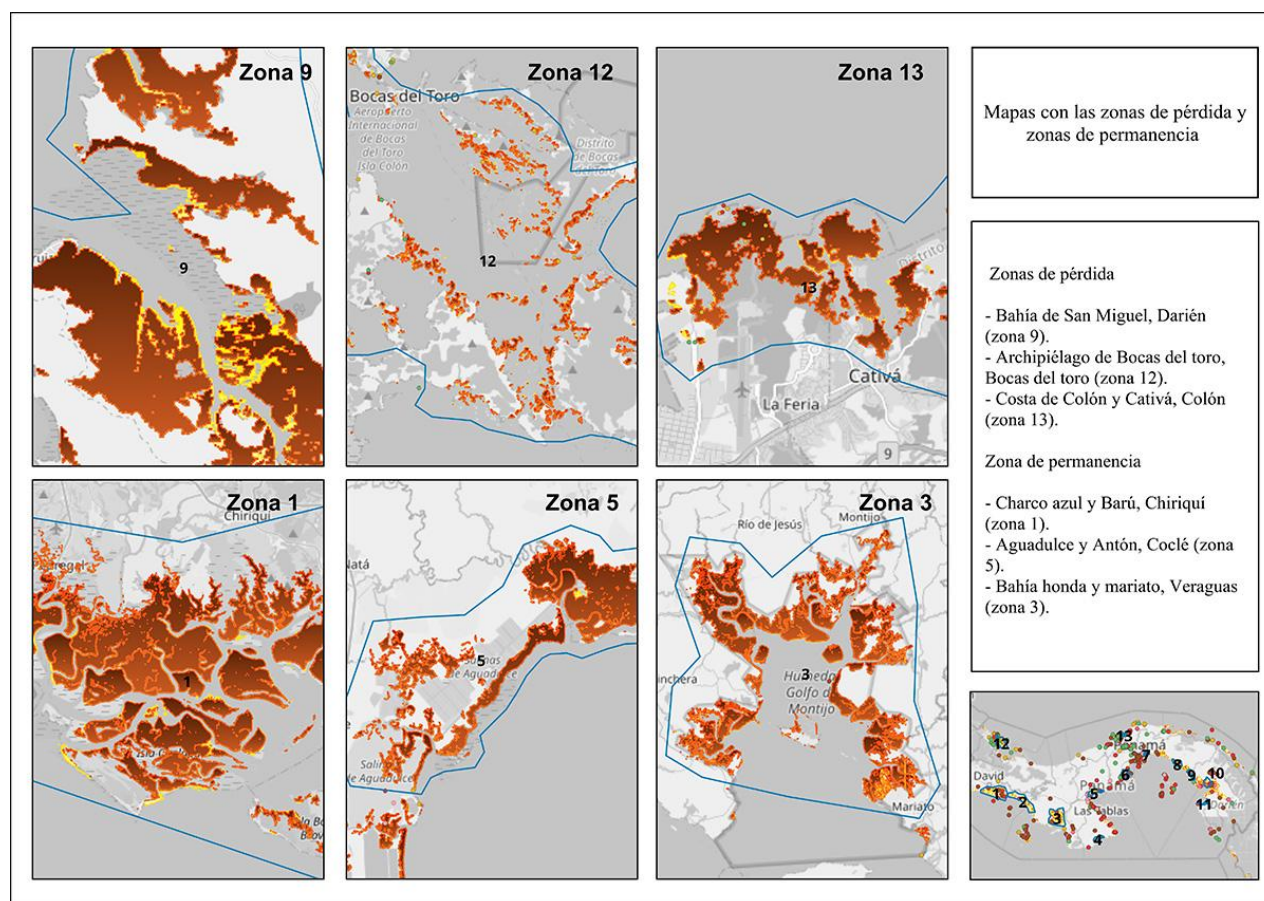


Figura 2. Mapas detallados de zonas con mayor pérdida y permanencia de cobertura de manglar (1996–2020). Se ilustran tres zonas con pérdidas destacadas (Zonas 9, 12 y 13) y tres zonas con permanencia superior al 94 % (Zonas 1, 3 y 5). Elaboración propia Qgis.

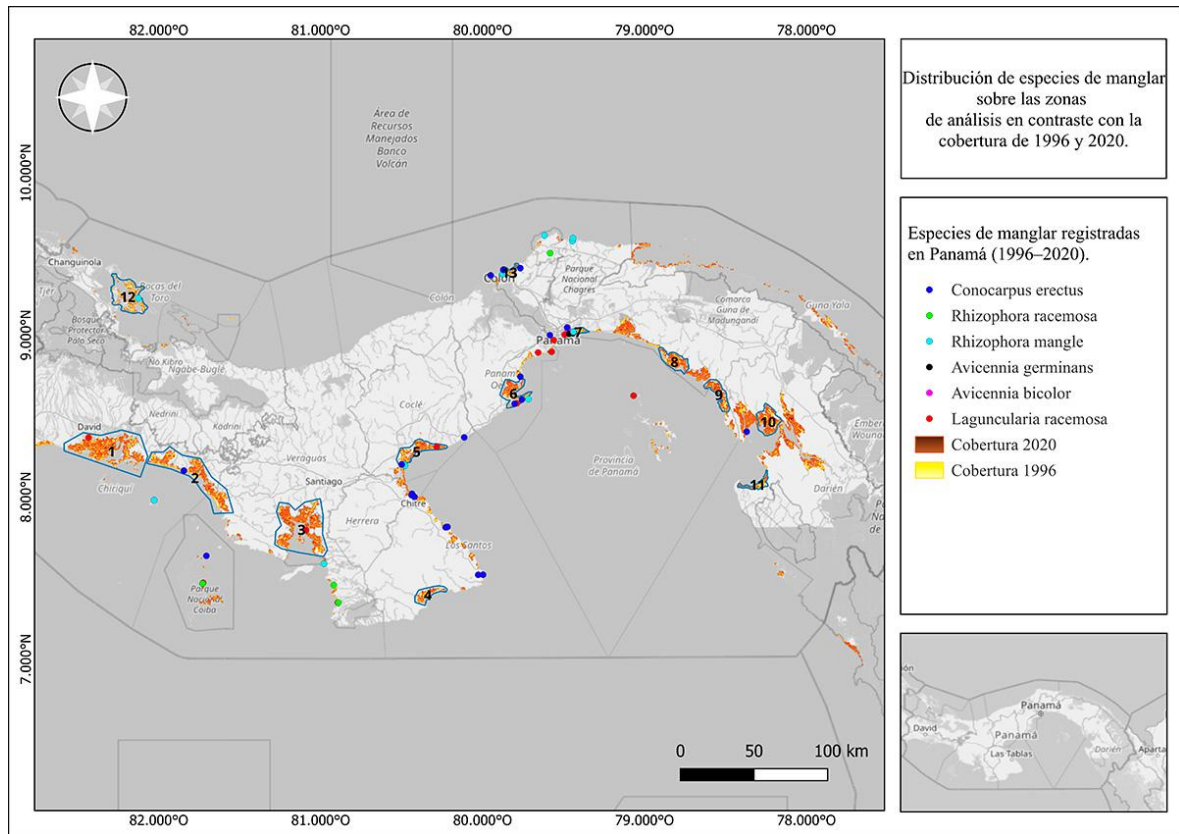


Figura 3. Distribución de especies vegetales de manglar en Panamá en relación con las zonas de análisis y la cobertura de 1996 y 2020. Se visualizan registros georreferenciados de especies clave en contraste con los polígonos de manglar y las coberturas multitemporales. Elaboración propia, Qgis.

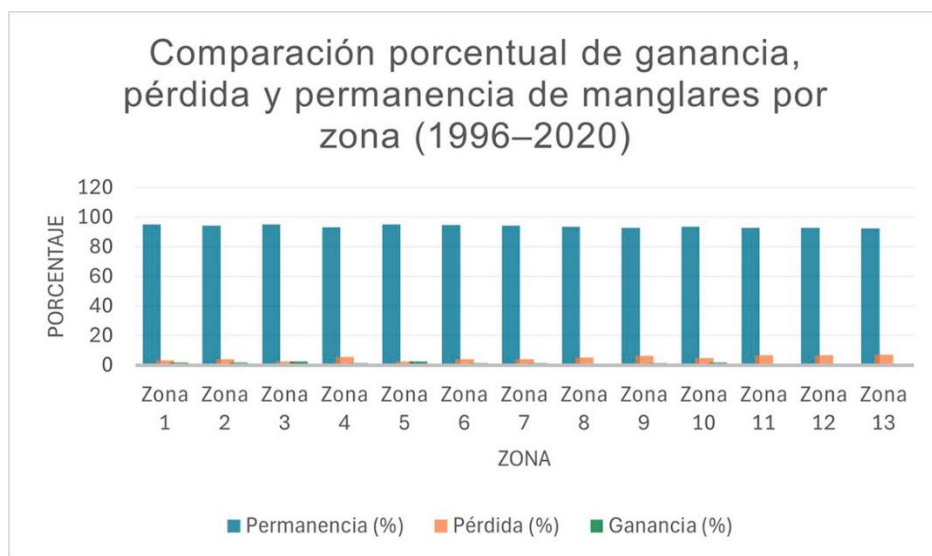


Figura 4. Se observa un patrón general de alta permanencia (>90 %) en la mayoría de las zonas, con focos de pérdida destacados en las Zonas 9, 12 y 13.



Figura 5. Bosque de manglar en una zona costera pacífica de Panamá

Tabla 1. Porcentajes de ganancia, pérdida y permanencia de cobertura de manglar (1996–2020) en trece zonas costeras de Panamá.

Zona	Ganancia (%)	Pérdida (%)	Permanencia (%)	Área total (ha)
Zona 1, Charco Azul y Barú (Chiriquí)	1.82	3.13	95.05	22,745.66
Zona 2, Montijo y Soná (Veraguas)	1.85	3.88	94.27	15,881.56
Zona 3, Bahía Honda y Mariato (Veraguas)	2.34	2.41	95.25	22,190.66
Zona 4, Tonosí y Cambutal (Los Santos)	1.31	5.50	93.19	3,212.12
Zona 5, Aguadulce y Antón (Coclé)	2.50	2.57	94.93	6,590.05
Zona 6, Chame y Bejuco (Panamá Oeste)	1.39	4.11	94.50	6,952.20
Zona 7, Ciudad de Panamá y Juan Díaz (Panamá)	1.44	4.15	94.41	14,064.27
Zona 8, Chepo y Chimán (Panamá Este)	1.18	5.24	93.58	3,892.71
Zona 9, Bahía de San Miguel (Darién)	1.28	6.20	92.79	13,108.93
Zona 10, Bahía de Garachiné y Puerto Piña (Darién)	1.62	4.74	93.64	7,081.67
Zona 11, Delta del Tuira y Jaqué (Darién)	1.01	6.61	92.71	5,060.19
Zona 12, Archipiélago (Bocas del Toro)	0.68	6.61	92.71	10,398.20
Zona 13Costa de Colón y Cativá (Colón)	0.61	6.97	92.42	3,434.20

Nota: resaltado en negrita mayor % perdida. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Global Mangrove Watch (2024) y análisis espacial en ArcGIS Pro.

Tabla 2. Especies vegetales asociadas a manglares en Panamá y su estado de conservación según la UICN (2024).

Nombre científico	Familia	Nombre común	Categoría UICN
<i>Rhizophora mangle</i>	Rhizophoraceae	Mangle rojo	Preocupación menor (LC)
<i>Avicennia germinans</i>	Acanthaceae	Mangle negro	Preocupación menor (LC)
<i>Laguncularia racemosa</i>	Combretaceae	Mangle blanco	Preocupación menor (LC)
<i>Conocarpus erectus</i>	Combretaceae	Botón de hojas plateadas	Preocupación menor (LC)
<i>Rhizophora racemosa</i>	Rhizophoraceae	Mangle gigante caballero	Preocupación menor (LC)
<i>Avicennia bicolor</i>	Acanthaceae	Mangle bicolor	Vulnerable (VU)
<i>Pelliciera rhizophorae</i>	Tetrameristaceae	Mangle piñuelo / mangle de té	Vulnerable (VU)

Fuente: Elaboración propia con base en datos de GBIF.org y la Lista Roja de la UICN (2024).

Discusión

Patrón espacial general

El análisis multitemporal de la cobertura de manglares en Panamá entre 1996 y 2020 reveló un patrón nacional de alta permanencia con valores superiores al 90 % en la mayoría de las zonas evaluadas (figura 1). Este resultado sugiere que el país ha mantenido una estabilidad estructural notable de manglar, en contraste con las tendencias globales de pérdida acelerada observadas en otras regiones tropicales. La zonificación aplicada permitió distinguir claramente variaciones espaciales regionales entre las costas Pacífica y Caribeña. Destacaron zonas del Pacífico, como Charco Azul y Barú (Chiriquí) y Bahía Honda y Mariato (Veraguas), con permanencias superiores al 95 %, mientras que sectores del Caribe, como Bocas del Toro y Colón, mostraron una mayor vulnerabilidad. Este patrón confirma la heterogeneidad espacial del manglar panameño y la importancia de considerar unidades regionales de análisis para la gestión costera.

Análisis de pérdidas

Las pérdidas más significativas se concentraron en tres regiones: Zona 13 (Costa de Colón y Cativá, 6.97 %), Zona 12 (Archipiélago de Bocas del Toro, 6.61 %) y Zona 9 (Bahía de San Miguel, Darién, 6.20 %, figura 2). Estas áreas presentan un mayor nivel relativo de alteración de la cobertura de manglar durante el período analizado. La literatura disponible para estas regiones sugiere que dichos patrones podrían estar asociados a presiones antrópicas como la expansión urbana, el desarrollo portuario, la actividad turística y procesos extractivos, así como a la conversión de suelos en zonas rurales (Méndez y Estrada, 2024). No obstante, se reconoce que la identificación precisa de las causas locales y de las especies de manglar más afectadas requiere estudios de campo.

Estas transformaciones reflejan la tensión que existe entre desarrollo económico y conservación ambiental, donde las presiones antrópicas localizadas afectan los ecosistemas. No obstante, la proporción total de pérdida nacional fue baja en relación con el tamaño del país, lo que indica que los procesos de degradación fueron específicos.

Análisis de ganancias

Las ganancias de cobertura fueron moderadas pero relevantes, con valores entre 0.6 % y 2.5 %. La Zona 5 (Aguadulce y Antón, Coclé) registró el mayor incremento (2.5 %), seguida por Montijo (Veraguas) y Chame (Panamá Oeste). Estos aumentos pueden deberse a procesos de regeneración natural posteriores a perturbaciones pasadas, o a iniciativas de reforestación y restauración comunitaria impulsadas por proyectos locales y gubernamentales (MiAMBIENTE, 2024). En la Bahía de Chame, por ejemplo, comunidades organizadas han desarrollado programas de plantación de *Rhizophora mangle* y *R. racemosa* en antiguos claros de extracción, lo que ha favorecido la recuperación de hábitats costeros degradados. Asimismo, variaciones intermareales y estacionales detectadas por sensores satelitales pueden explicar ligeros incrementos aparentes, sin que necesariamente impliquen expansión permanente del ecosistema (Bunting et al., 2018).

Análisis de permanencia

La permanencia superior al 90 % en casi todas las zonas refleja no solo la resiliencia natural del manglar, sino también su integración funcional en la idiosincrasia del pueblo costero panameño (figura 5). Los manglares proveen servicios ecosistémicos esenciales, como protección frente a tormentas, control de erosión, almacenamiento de carbono azul, provisión de alimentos y materias primas, además de ser hábitat de cría para especies marinas de interés pesquero (Fundación Humedales, 2016). En comunidades de Montijo, Parita, Bahía de Chame y el Golfo de San Miguel, la pesca artesanal depende directamente de estos bosques, los cuales sirven como refugios naturales para peces e invertebrados. Asimismo, en zonas como Capiro y Chame, el manglar ha sido utilizado para la producción de carbón vegetal y leña doméstica, actividad que, aunque presiona al ecosistema, ha sido regulada mediante prácticas de sustitución de especies y reforestación, permitiendo la estabilidad del manglar.

El mantenimiento prolongado de la cobertura es entonces consecuencia de un sistema socio-ecológico en equilibrio, donde la conservación y el aprovechamiento se complementan, asegurando tanto el bienestar humano como la integridad del ecosistema (MiAMBIENTE, 2017).

Especies de manglar y zonas de refugio ecológico

El conjunto florístico panameño está formado por siete especies de manglar: *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa*, *Avicennia germinans*, *Avicennia bicolor*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* y *Pelliciera rhizophorae*.

El mapa de distribución de especies de manglar elaborado a partir de registros de GBIF refleja patrones de presencia geográfica y no de dominancia estructural o abundancia relativa (figura 3). En este contexto, *Conocarpus erectus* presenta una amplia distribución tanto en la costa del Pacífico como en el Caribe panameño, principalmente asociada a zonas de borde, áreas de transición y ambientes costeros perturbados. No obstante, de acuerdo con información institucional del Ministerio de Ambiente, las especies que conforman la

estructura dominante del manglar panameño, particularmente en la vertiente del Pacífico, son *Rhizophora mangle* y *Rhizophora racemosa*, las cuales constituyen el componente arbóreo principal del ecosistema.

De las especies registradas, *Avicennia bicolor* y *Pelliciera rhizophorae* están clasificadas como Vulnerables (VU) (tabla 2) por la UICN (2024), debido a la fragmentación de sus poblaciones y a la reducción de hábitat en gran parte de su rango de distribución. Los resultados de este estudio indican que ambas especies se concentran en zonas de alta permanencia, especialmente Montijo, Bahía Honda, Aguadulce y Chame, donde las condiciones ecológicas se han mantenido estables. Estas regiones actúan como refugios ecológicos costeros, conservando no solo la integridad del bosque, sino también la conectividad genética entre poblaciones del Caribe y del Pacífico. En este sentido, los manglares panameños cumplen una función biogeográfica estratégica, al enlazar las dos vertientes marinas del istmo y ofrecer hábitats de persistencia para especies amenazadas, lo cual refuerza su prioridad de conservación (Lugo Snedaker, 1974).

Contexto global y síntesis

A nivel mundial, los manglares han sufrido una pérdida acumulada de hasta un 35 % en las últimas décadas, con tasas anuales de deforestación que superan el 0.6 % en regiones del sudeste asiático (Friess et al., 2019) Frente a este panorama, Panamá representa un caso excepcional de estabilidad, con una cobertura mantenida superior al 90 % durante más de dos décadas. Este logro puede explicarse por la combinación de tres factores: Condiciones naturales favorables, como la amplia disponibilidad de zonas intermareales y baja industrialización costera; Valoración institucional y comunitaria del manglar por sus servicios ecosistémicos, reflejada en políticas y programas de restauración; y Participación social activa, mediante el uso tradicional sostenible, la pesca artesanal y el ecoturismo. De esta forma, los manglares panameños son hoy refugios ecológicos, donde convergen biodiversidad, estabilidad ambiental y beneficio económico.

Se debe fortalecer las estrategias de conservación para mantener el equilibrio de estos ecosistemas. Conservar los manglares de Panamá no solo protege especies vulnerables como *Pelliciera rhizophorae* y *Avicennia bicolor*, sino que también garantiza la resiliencia climática, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad costera del país. Panamá se consolida como un modelo de manejo integral de humedales costeros, donde la ecología y la sociedad actúan de forma conjunta en favor de la permanencia del paisaje.

Conclusión

El presente estudio evidenció que, entre 1996 y 2020, los manglares panameños han mantenido una alta estabilidad espacial, con más del 90 % de su cobertura original conservada. Este resultado posiciona a Panamá como uno de los países con mayor permanencia de manglares en la región neotropical.

Las pérdidas, concentradas principalmente en las zonas de Colón, Bocas del Toro y Bahía de San Miguel, se asocian a presiones localizadas como la expansión urbana, portuaria y agropecuaria. Sin embargo, la regeneración natural y los proyectos comunitarios de restauración en áreas como Aguadulce, Montijo y Bahía de Chame han favorecido la recuperación parcial del ecosistema, evidenciando su capacidad de resiliencia. La permanencia observada está estrechamente vinculada a la dependencia social y económica de las comunidades costeras respecto al manglar, ya que este provee recursos esenciales para la pesca artesanal, el uso energético y la protección costera.

La persistencia de especies vulnerables como *Pelliciera rhizophorae* y *Avicennia bicolor* en zonas de alta estabilidad refuerza el papel de los manglares panameños como refugios ecológicos y biogeográficos de importancia regional. En conjunto, los resultados demuestran que la conservación del manglar en Panamá depende tanto de los procesos ecológicos como del reconocimiento social de su valor. Por ello, se recomienda fortalecer los programas de monitoreo, educación ambiental y restauración participativa, orientados a consolidar el manejo sostenible de estos ecosistemas frente a las amenazas emergentes del cambio climático y la expansión costera.

Referencias

- Bunting, P., Rosenqvist, A., Lucas, R., Rebelo, L. M., Hilarides, L., Thomas, N., Hardy, A., Itoh, T. y Finlayson, C. M. (2018). The Global Mangrove Watch—A New 2010 Baseline of Mangrove Extent. *Remote Sensing*, 10(10), 1669. <https://doi.org/10.3390/rs10101669>
- CATHALAC (2007). *Sistema Nacional de Información Ambiental de Panamá (SINIA): bases cartográficas y ambientales*. Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), Ciudad de Panamá, Panamá.
- Friess, D. A., Thompson, B. S., Brown, B., Amir, A. A., Cameron, C., Koldewey, H. J., Sasmito, S. D., Sidik, F., Sillanpää, M., van Laveren, H. y Webb, E. L. (2019). Policy challenges and approaches for the conservation of mangrove forests in Southeast Asia. *Conservation Biology*, 33(3), 525–537. <https://doi.org/10.1111/cobi.13279>
- Fundación Humedales. (2016). Los humedales en América Latina: situación actual y perspectivas. Buenos Aires: Fundación Humedales / Wetlands International.
- GBIF.org (2024). GBIF Occurrence Download. Global Biodiversity Information Facility. Disponible en: <https://www.gbif.org/> (Consultado el 16 de julio de 2025).
- Global Mangrove Watch (2024). Mangrove habitat area and species status in Panama. Disponible en: <https://www.globalmangrovewatch.org> (Consultado el 17 de julio de 2025).
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S. A., ... & Robarts, R. D. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic sciences*, 75(1), 151-167.
- Lugo, A. E. y Snedaker, S. C. (1974). The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, 39–64. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.000351>
- Méndez, A. y Estrada, D. (2024). Impacto de la deforestación de los manglares de la Bahía de Chame y medidas de mitigación ambiental. *Tecnociencia*, 26(1), 44–59.
- Ministerio de Ambiente MiAMBIENTE. (2017). Los manglares, pilar de la economía azul en Panamá. Ministerio de Ambiente de Panamá
- Ministerio de Ambiente (MiAMBIENTE). (2024). *Estrategias de conservación, restauración y manejo de los ecosistemas de manglar en Panamá*. Ministerio de Ambiente, República de Panamá. <https://www.miambiente.gob.pa>
- Singh, A. (1989). Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6), 989–1003. <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- UICN (2024). Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN: Evaluaciones globales de especies de manglar. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Disponible en: <https://www.iucnredlist.org/>

Anexos

Tabla 3. Cuadro ampliado con información relevante sobre el estado de conservación de especies clave de manglar en Panamá, incluyendo sus principales amenazas según la Lista Roja de la UICN (2024) y observaciones sobre sus poblaciones en territorio nacional.

Especie (familia, nombre común)	Estado de conservación (UICN)	Amenazas principales	Descripción de la población
<i>Rhizophora mangle</i> (Rhizophoraceae, mangle rojo)	LC (Preocupación menor)	Desarrollo residencial y comercial (vivienda, áreas urbanas); agricultura y acuicultura (cultivos no maderables anuales y perennes, acuicultura marina y de agua dulce); uso de recursos biológicos (tala y recolección de madera); cambio climático y eventos extremos (cambio y alteración del hábitat)	Tendencia poblacional decreciente. Forma a menudo poblaciones densas y monoespecíficas en la costa; aunque globalmente abundante, sufre declives locales por desarrollo y agricultura
<i>Avicennia germinans</i> (Acanthaceae, mangle negro)	LC (Preocupación menor)	Desarrollo residencial y comercial; agricultura y acuicultura (cultivos no maderables, ganadería, acuicultura marina y de agua dulce); uso de recursos biológicos; cambio climático y eventos extremos	Tendencia poblacional decreciente; en Bahía Las Minas (Panamá) existen 1 200 ha de manglar (~0,3 % del total nacional)
<i>Laguncularia racemosa</i> (Combretaceae, mangle blanco)	LC (Preocupación menor)	Desarrollo residencial y comercial (vivienda, áreas comerciales e industriales); agricultura y acuicultura (cultivos no maderables, acuicultura marina y de agua dulce); uso de recursos biológicos; intrusiones y perturbaciones humanas; contaminación (aguas residuales, efluentes industriales y agrícolas, basura); cambio climático y eventos extremos	Tendencia poblacional decreciente. En el Golfo de Panamá, los bosques de <i>L. racemosa</i> muestran regeneración activa tras perturbación, indicando resiliencia
<i>Conocarpus erectus</i> (Combretaceae, botón de hojas plateadas)	LC (Preocupación menor)	Desarrollo residencial y comercial; agricultura y acuicultura (cultivos no maderables, acuicultura marina y de agua dulce); uso de recursos biológicos; cambio climático y eventos extremos	Tendencia poblacional decreciente.
<i>Rhizophora racemosa</i> (Rhizophoraceae, mangle gigante caballero)	LC (Preocupación menor)	Desarrollo residencial y comercial; agricultura y acuicultura (cultivos no maderables, acuicultura marina y de agua dulce); uso de recursos biológicos; cambio climático y eventos extremos	Tendencia poblacional decreciente.
<i>Avicennia bicolor</i> (Acanthaceae, mangle bicolor)	Vulnerable (A2cd)	Desarrollo residencial y comercial; agricultura y acuicultura (ganadería); uso de recursos biológicos; cambio climático y eventos extremos	Tendencia poblacional decreciente; caída de ~31 % en 30 años por pérdida de hábitat de manglar.



Pelliciera rhizophorae
**(Tetrameristaceae,
mangle piñuelo /
mangle de té)**

Vulnerable
(B2ab(iii))

Desarrollo residencial y comercial (áreas comerciales, turismo y recreación); agricultura y acuicultura; corredores de transporte (carreteras, ferrocarriles); contaminación (basura y residuos); cambio climático y eventos extremos

Población gravemente fragmentada y decreciente; distribución desde Pacífico de Costa Rica a Ecuador y Caribe de SE Honduras a Panamá; subpoblaciones altamente diferenciadas con flujo genético mínimo

Preliminary laboratory assessment for lignocellulosic biomass drying

Evaluación preliminar de laboratorio para el secado de biomasa lignocelulósica

Julio F. Mata-Segreda

<https://orcid.org/0000-0002-2356-4699>

Biomass Laboratory, School of Chemistry, University of Costa Rica, 11501-2060, Costa Rica

Autor correspondiente: julio.mata@ucr.ac.cr

Enviado: 2 de Agosto de 2025. **Aceptado:** 1 de octubre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i2.993>

Abstract

The drying of lignocellulosic biomasses is an important unit operation in regions with agro-industrial economies and circular economy activities in general. The procedures used in the author's laboratory to obtain drying kinetic data, and their mathematical processing are discussed, to quantify the characteristics of lignocellulosic biomasses and porous materials in general. The results serve as a starting point for the design and operation of industrial dryers.

Keywords

Drying kinetics, dynamic porosity, minimal energy drying cost, molecular diffusion in pores.

Resumen

El secado de biomasa lignocelulósica es una operación unitaria de importancia en regiones con economías agroindustriales y actividades propias de economía circular en general. Se discuten los procedimientos usados en el laboratorio del autor para la obtención de datos cinéticos de secado y su tratamiento matemático, para cuantificar las características de biomasa lignocelulósica y materiales porosos en general. Los resultados son el punto de partida para el diseño y operación de secadores industriales.

Palabras clave

Cinética de secado, costo energético mínimo de secado, difusión molecular en poros, porosidad dinámica.

Introduction

Drying of lignocellulosic biomasses and other agro-industrial residues is an area of direct interest in regions with agro-industrial economies. The reduction of moisture is a first physical treatment on raw materials, before any extraction or physical/chemical change is conducted.

Reduction of water content (or other liquids) from porous materials is a common technological operation. The theoretical aspects of this unit operation apply to different areas such as food preservation by moisture reduction (Inyang, et al., 2018), heterogeneous catalysis (Fernández-Solano & Mata-Segreda, 2021) or performance of building materials (Carter and Kibler, 1978; Mora et al., 2019).

The design, construction and operation of industrial dryers must be consistent with prior observations on the drying kinetic behaviour of specific porous materials at laboratory level. These previous experiments are necessarily done, for the assessment of the ease of moisture reduction of porous materials.

Most published papers on material drying deal with specific cases, and fewer papers deal with the theoretical aspects of diffusion of fluids in pores (Yiotis, et al., 2006; Songgok, et al. 2012; Inyang, et al., 2018; Alcántara, et al., 2024; Schlaich, et al., 2025) or basic mathematical analysis of drying kinetics data (Smirnov & Lysenko, 1989; Kemp, et al., 2001; Mora, et al., 2019). Some mathematical proposals have no direct bearing on molecular conceptions of the drying process but rely more on goodness-of-fit criteria.

This work gives the simpler view of the macro- and microscopic aspects of drying studies at our laboratory, than the more complex versions presented in unit-operations textbooks and review articles (Geankoplis, 2006; Cai, et al., 2023; Schlaig, et al., 2025). This work is not intended to be a review article, but a document that shares our experience on the subject, specially aiming at the needs of laboratories of small companies. It should not be expected to deal with the drying of specific materials, either. Therefore, no considerations will be made for the effect of the variables necessary for optimal reduction of moisture such as environmental humidity, temperature, or velocity of purging air currents.

Working model

Drying dynamics is influenced by mass and heat transfer, as well as diffusion of fluid from the moist sample into the surrounding aerial phase (Geankoplis, 2006). The operation is conducted in industrial systems under the flow of a purge gas, to enhance water recovery and reduce drying times and energy.

In our model, the molecular picture of drying of porous materials is a process that initially involves the direct phase transfer from the liquid film on the particles surface to a stagnant surrounding aerial space. It is observed that the drying rate during this stage is constant. It is interpreted that this zero-order kinetic regime occurs if the rate of evaporation equals the rate of arrival of evaporating molecules at the solid-gas interface. This mechanistic proposal is like the situation of pure liquids, and implies an almost constant interfacial composition with a constant vapour pressure; as indicated by the traditional Hertz-Knudsen equation (Mata-Segreda, 2025):

$$\frac{-dn_{liq}/dt}{\text{Fluxional area}} = \kappa \frac{p_v(T)}{\sqrt{2\pi MRT}} \quad (1)$$

where κ is the so-called condensation factor, $p_v(T)$ is the liquid vapour pressure at temperature T , M is the liquid molecular mass, and RT has the usual meaning. The rate of evaporation is clearly constant at a fixed temperature.

As the drying process occurs, “dry islands” appear on the solid matrix surface once a critical degree of drying $[x_c]$ is reached, and the kinetics is no longer zero order. The hydraulic continuity between bulk moist material and particle surface no longer exists. From this point afterwards, the kinetics is determined by mass transfer through the solid matrix pores. As said above, the zero-order regime extends for as long as H_2O molecules arrive at the particle-air interface as fast as evaporation occurs. It then follows that those materials with higher x_c (longer constant-rate intervals) match those with high mass-transfer characteristics (Puente-Urbina, et al. 2016).

This second rate-decreasing stage is the result of:

- a) slower liquid mobility inside the matrix pores, thus reducing the probability of transfer to the near aerial phase,
- b) the fluxional areas of liquids soaking porous materials are also diminished, and
- c) liquid desorption from porous materials requires the breaking apart of any stabilising interactions of the imbibing fluid with the pore walls. All three conditions make overall evaporation more difficult than the case of a free liquid surface.

For this rate-decreasing stage, it is intuitively certain that the drying rate of a particular material at temperature T and through a certain fluxional area must be proportional to the residual moisture content. This mathematical assertion is stated as:

$$\text{Drying rate} \propto \text{Residual moisture} \quad (2)$$

Materials and Methods

Kinetic drying measurements are usually conducted in our laboratory at 50 °C and the normal atmospheric pressure over the University of Costa Rica central campus $[(87 \pm 2) \text{ kPa}]$ at 1229 m above sea level]. The relative humidity in the laboratory is maintained at around 65 %.

Our methodology uses drying balances and the absence of purging air currents. These balances have draft shields that allow doing gravimetric measurements under a minimum effect from surrounding air drafts in the laboratory environment. These instruments are also built with heat shields that allow samples to be heated quite evenly at the experimental temperature. Construction details are provided by manufacturers. The kinetic measurements are done by following the mass loss of a sample, as a function of time at constant temperature.

The solid samples are typically soaked overnight with distilled water. Before the gravimetric measurements are conducted, the materials are filtered (Büchner funnel) and gently pressed between kitchen towels, to obtain a free-flowing solid. One crucial point is to keep samples under refrigeration in tightly stoppered containers prior to kinetic measurements,

to avoid inadvertent moisture loss.

The biomass sample (~ 10 g) is then loosely spread on the balance aluminium dishes, and the mass – time data monitored until no further change occurs, a point in time indicated by the drying balance.

Results

Figure 1 shows a typical drying result of a sample of compost made from coffee dregs, as a model material like common lignocellulosic biomasses. In this run, the drying operation time profile shows an initial linear decay, followed by a rate-decreasing kinetic phase. The data of the experiment shown indicate that thermal equilibration between the specimen and sample chamber takes ~3 minutes. The linear range extends from 3,0 min up to 35,0 min ($r_p = 0,9995$).

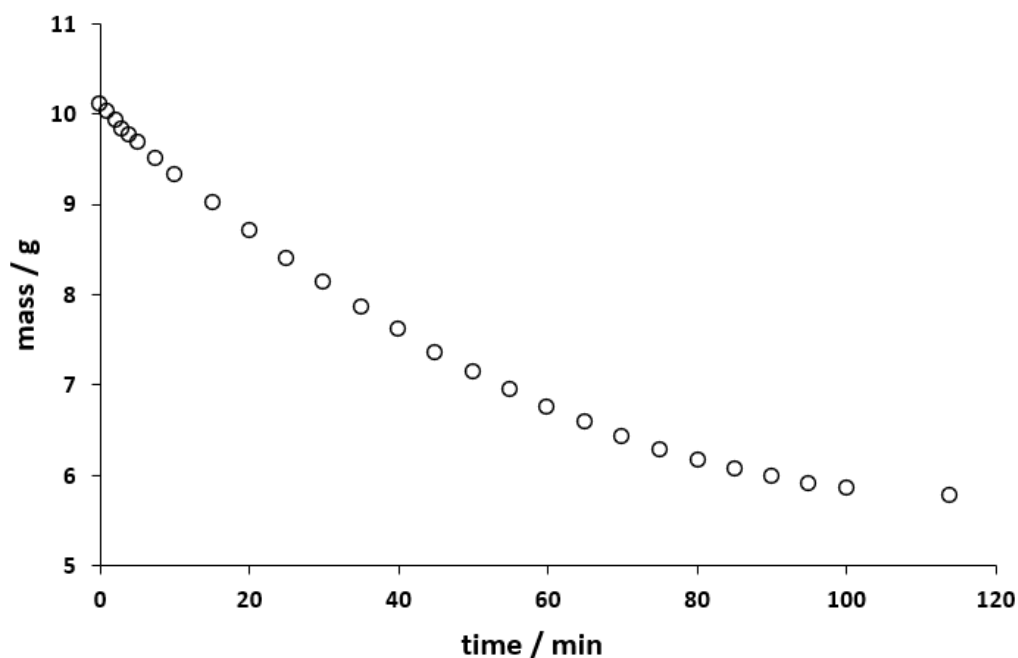


Figure 1. Typical mass-time data at 50 °C and 87 kPa, for drying of a compost made from industrial coffee dregs.

The initial sample of mass $m_{initial} = 10,101$ g dries down to a final mass $m_{final} = 5,777$ g. The total H₂O desorption was 42,8 % of the initial sample mass. The ease of drying of porous

materials depends on three characteristics of the different solid matrices:

- a) volumetric porosity (fraction of total volume that equals empty space),
- b) pore constrictivity (pore dimensions), and
- c) pore tortuosity (mean trajectory inside pores, relative to macroscopic particle dimensions).

We have termed these three characteristics together as *dynamic porosity* (Puente-Urbina, et al., 2016; Conejo-Barboza and Mata-Segreda, 2018). For a particular sample, we usually perform three runs, or five, depending on the reproducibility obtained.

The kinetic description of the entire drying processes is described by the so-called Krischer plot, which gives the rate of drying as a function of residual moisture, as shown in figure 2 (Kemp, et al., 2001). The dynamics of drying shows the initial constant-rate kinetic phase, that is, mass loss decreases at a constant rate during this period ($-dm/dt = \text{constant}$). Our experience dictates that the initial mass-time linear relationship is described with a Pearson's $|r_p| \geq 0,9995$ (99,9 % goodness of fit). The system eventually achieves a critical degree of drying $[x_c]$, where $-dm/dt$ becomes discontinuous, though $m = m(t)$ is a continuous function.

The usual way to describe the data is by using the extent of drying (x) as the dependent variable. It is clearly defined as:

$$x(t) = \frac{m_{\text{initial}} - m(t)}{m_{\text{initial}} - m_{\text{final}}} \quad (3)$$

The rate of advancement of the drying operation is then:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(-dm/dt)}{(m_{\text{initial}} - m_{\text{final}})} \quad (4)$$

Figure 2 shows the concept.

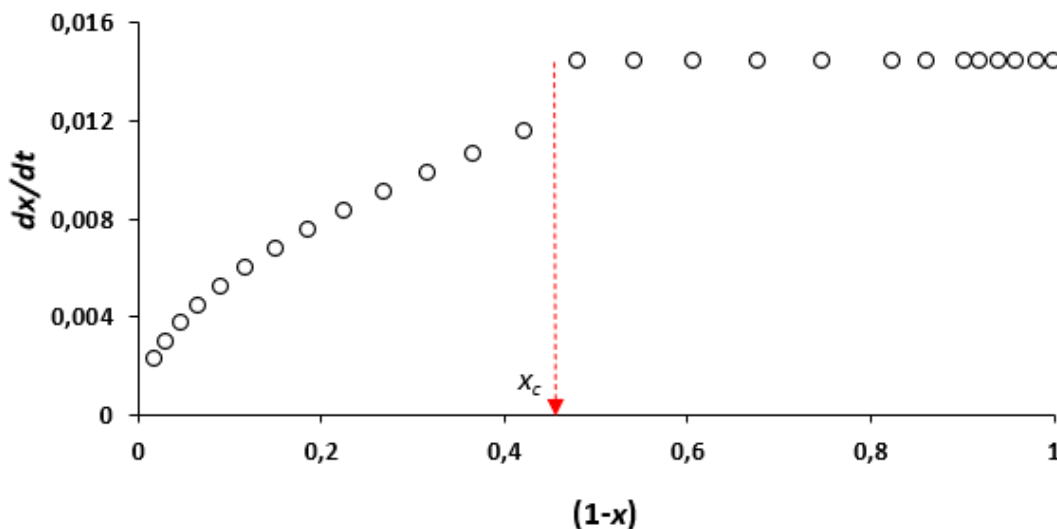


Figure 2. Krischer curve at 50 °C and 87 kPa for the drying of a compost made from coffee dregs.

The initial constant-rate kinetic phase is clearly observed, up to the critical drying degree x_c . After x_c is achieved, the system obeys a first-order rate law, which is $dx/dt = k_1 (1 - x)$. For the experiment shown in figure 2, the linear relationship between dx/dt and $(1 - x)$ is observed in the range from $(1 - x) = 0,423$ to $(1 - x) = 0,151$. We commonly accept a r_p value of $\sim 0,999$ to define the first-order kinetic phase. The k_1 is obviously the slope in the linear range, calculated by least-squares fitting.

The first-order rate constant is found to depend directly on the mean particle-surface/air area. Therefore, the useful datum needed to evaluate for this kinetic stage is $k_2 = k_1 /$ fluxional area.

The fluxional area of a particular sample can be calculated from $(-dm/dt)_{initial}$ and the rate of evaporation of H_2O at the working temperature [e. g. $r_{evap}(H_2O, 50\text{ °C}) = 0,18\text{ g s}^{-1}\text{ m}^{-2}$ at 50 °C], according to the following relation:

$$\text{Fluxional area} = \frac{(-dm/dt)_{initial} \text{ g s}^{-1}}{r_{evap}(H_2O) \text{ g s}^{-1}\text{ m}^{-2}} \quad (5)$$

k_2 values can be used to compare the internal diffusion ability of fluids imbibing porous materials (*vide infra*).

It is possible sometimes to observe a third kinetic phase, depending on the precision of the $m(t)$ values as the final stage of the drying process occurs. If this third stage takes place driven by concentration gradients in the pore system, the advance of the drying process occurs as a function of $t^{1/2}$ as expected from compliance to Fick's second law, though fitting of experimental results to analytical integration of the diffusion equation have become a more common procedure (Carter and Kibler, 1978; Mora, et al., 2019). When capillary forces are at work, the easiest way to quantify the process is by empirically fitting the $x(t)$ data to a power law, t^q ($q \neq 1/2$).

Despite the natural heterogeneity of lignocellulose material samples, the reproducibility of kinetic drying parameters such as $(dx/dt)_{\text{initial}}$, x_c and k_2 can be obtained with mean uncertainties of the order of 8 %, 11 % and 11 %, respectively. The latter mass data shown in figure 1 (third kinetic phase) give $x/m_{\text{final}} = (2,4 \pm 0,7) \text{ g}^{-1} t^{(0,43 \pm 0,02)}$, a result with an associated 30 % uncertainty, calculated as standard deviation. The uncertainties associated to this last rate parameter are larger than for those of the earlier kinetic phases, due to fewer data points and their lesser accuracy.

Calculation of the pseudo first-order rate constant

The calculation of accurate dx/dt values is important, and a derivable function of x in terms of time is needed. This is done empirically, and Occam's razor is the most prudent way to follow. The mass-time data pairs after x_c are fitted to a cubic polynomial, for the direct calculation of dx/dt . The cubic choice is based on the need of having enough curvature ($d^2m/dt^2 \neq 0$) for the calculation of $-dm/dt$ at the various times. The use of higher-degree polynomials should be avoided, because over smoothing of the $m(t)$ data may lead to concealing or distortion of physical information, and substantial errors may result in the further design of an industrial dryer (Kemp, 2001). Two curves may be close together, but still have different slopes (Scheid, 1968).

In any case, it is important to bear in mind that the polynomial fitting has no physical meaning, since it is just a regression equation. The fitting can be obtained by using *Excel* or any suitable software:

$$x(t) = a + bt + ct^2 + et^3 \quad (6)$$

The values of dx/dt at different times come from direct differentiation and evaluation at the various times:

$$\frac{dx}{dt} = b + 2ct + 3et^2 \quad (7)$$

Discussion

A. Follow up from raw biomaterial to final product

It is important to evaluate how different the physical structures of raw biomaterials and final products result, after a certain process is performed. For the mentioned H₂O-soaked compost made from coffee dregs and the original raw agro-industrial residue [(82,7 ± 0,2) % H₂O content], one obtains the following kinetic parameters at 50 °C as shown in Table 1:

Table 1. Effect of composting on the drying kinetic features of coffee dregs, 50 °C and 87 kPa.

Parameter	Raw coffee dregs	H ₂ O-soaked compost
% (H ₂ O) _{desorbed} , 50 °C	77 ± 5	42 ± 1
10 ⁴ (dx/dt) _{initial} / s ⁻¹	3,4 ± 0,8	2,6 ± 0,1
x _c	0,50 ± 0,05	0,50 ± 0,02
10 ² k ₂ / s ⁻¹ m ⁻²	2,5 ± 0,4	5,65 ± 0,07

a) The amount of H₂O desorbed from the initial raw material is greater than the case of final H₂O-soaked compost [(77 ± 5) % vs. (42 ± 1) %, $p < 0,01$). The datum for the raw dregs sample is the sum of “surface”, intra-matrix, and inter-particle H₂O. The experiment with the dregs was done without pressing the sample between kitchen towels, as described above.

b) The initial relative rates of drying [(dx/dt)_{initial}] showed no statistically significant variation. It is known that the rate of evaporation of liquids is independent of the

surface the fluid lays down (Geankoplis, 2006), being only dependent on the geometrical features of particles that define the magnitude of the fluxional area. Comparison of the x_c values cannot be done from these results, because the elimination of the excess inter-particle H_2O was not effectuated for the case of the raw dregs sample.

c) A significant difference was observed in the values of the mass-transfer parameter [k_2]. The result is understood by keeping in mind that composting changes the chemical and physical structure of materials, and consequently, the dynamic porosity of the initial substrate becomes altered. One can believe the 2,3 X difference in k_2 between the final compost product and the initial dregs material is the result of lower tortuosity of pores resulting from the composting process.

B. Comparison of dynamic porosity of different lignocellulosic biomasses

A study discussed by Puente-Urbina et al. (2016) is a good example of the usefulness of the simple procedure presented in this article.

The potential value of forest and agro-industrial residues as solid fuels is well appreciated by the agribusiness sector. The materials must have low moisture content, and the ease of drying of these raw feeds is a central point for the assessment of lignocellulosic stuffs as thermal energy assets. Because drying is an energy-demanding unit operation, the molecular aspects of water diffusion in biomass pores are important to consider for their utilisation as fuels. Diffusion of fluids in pores is also significant for the understanding of combustion and other thermochemical conversions, such as gasification and pyrolysis. Flames originate from the oxidation of the thermally produced gases, that “catch fire” once in contact with oxygen at the particles’ surfaces. Incomplete combustion gives rise to undesired amounts of carbon monoxide, hydrocarbons and tar. This results in lower combustion power and high emission of pollutants.

Puente-Urbina, et al. (2016) determined the x_c of 14 sawdust samples of tropical trees of commercial and environmental importance: *Carapa guianensis*, *Vochysia guatemalensis*, *Lecythis ampla*, *Tectona grandis* L. f., *Enterolobium cyclocarpum*, *Gmelina arborea*, *Cordia*

alliodora, *Ficus werkleana*, *Cedrela odorata* (orange tint), *Cedrela odorata* (dark tint), *Pinus caribaea*, *Samanea saman*, *Rollinia* sp., *Hyeronima alchorneoides*.

Thirteen (13) species showed an average $x_c = 0,26 \pm 0,03$ whereas *L. ampla* showed the higher value $x_c = 0,41 \pm 0,02$. The results can be kinetically interpreted as the latter having a greater degree of dynamic porosity. The authors discussed that *L. ampla* may have been considered different from the beginning, because this species' sapwood has more vascular fibres. Its fresh wood is heavy (high degree of compaction) with specific gravity of about 0,60 – 0,90 in the dry state, compared to the average value $0,4 \pm 0,1$ in the group of reference ($p < 0,01$). From the anatomical viewpoint, it can be said that high specific gravities correlate with thicker xylem walls (higher mass-transfer capacity).

C. Drying of fresh wood

The incorporation of agro-industrial and forestry residues in the production of construction particle boards is an option to minimise the polluting effect of this kind of residuary materials. Agro-industrial remnants are also of value as animal food, animal bedding, or generation of process-heat and steam. Their ashes can be used as source of minerals to produce fertilisers and incorporated into circular-economy opportunities. Whatever final use they are aimed at, they require easy handling and storage stability, and the least possible moisture content.

Drying is an energy-demanding unit operation, and therefore it is necessary to consider the dynamic porosity of the materials whose water content must be reduced. The minimum energy expenditure in laboratory conditions of a porous material can be estimated from its drying curve.

The residential electric outlet in Costa Rica gives 110 V electric potential, and the balances in our laboratory consume 4 A electric current. For a particular test, the normalised electrical energy used by the drying balances equals to the quantity $(110 \text{ V} \times 4 \text{ A} \times \text{time})/m_{\text{initial}}$ (Puente-Urbina, et al. 2016; Conejo-Barboza and Mata-Segreda, 2018). A plot of energy vs. amount of residual moisture can be constructed, and figure 3 shows the case of the drying of a sample of the compost mentioned above as example.

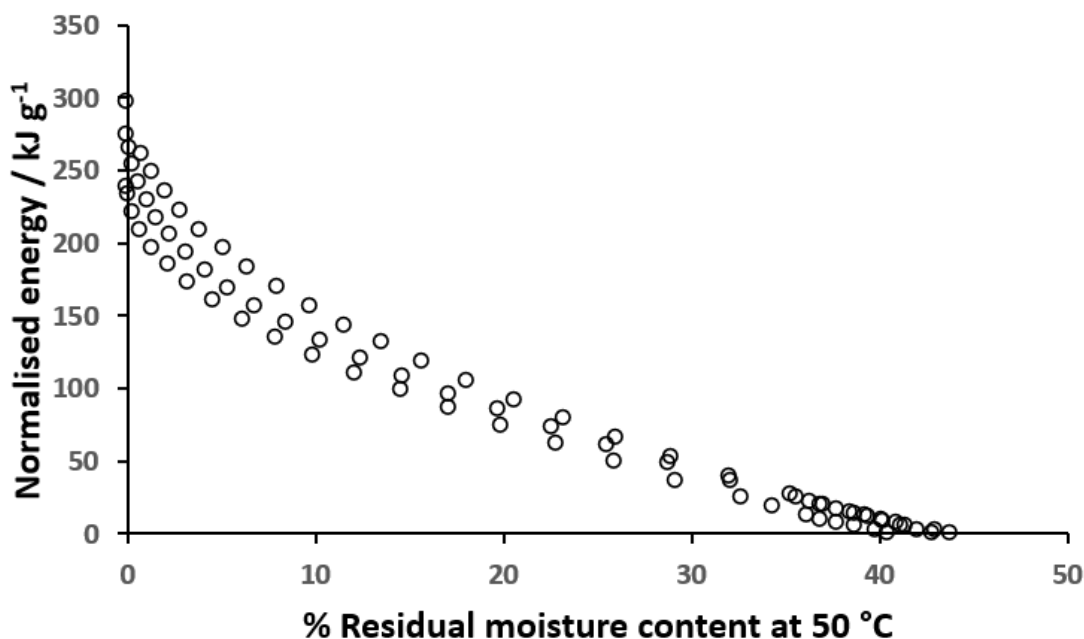


Figure 3. Laboratory normalised energy cost for the drying of H₂O-soaked compost from coffee dregs, 50 °C, 87 kPa and laboratory relative humidity ~ 65 %.

A linear relationship between the energy used and the amount of residual moisture can be observed in the range from the initial condition down to ~21 % of residual moisture content. This limit corresponds to $x_c = 0,50 \pm 0,05$. The molecular mechanism of this drying stage corresponds to “superficial” evaporation, as the rate determining step; a situation like the evaporation from a free-liquid surface. Beyond this point, drying depends on internal diffusion through the solid matrix pores. Since now there is less drying (H₂O evaporation) per unit thermal energy input, the process deviates from the initial linearity. Botanists and plant physiologists may find this kind of observation of interest to establish structure-function correlations.

Engineers may be able to estimate the minimal amount of thermal energy needed to conduct the drying process of porous materials, by interpolation from plots such as the one shown. The actual energy cost is obviously dependent on the nature of the material to be dried, the amount of raw material, its degree of hydration, desired final moisture content,

heating input, mechano-electrical energy needed for forced purging air currents, heat sinks, etc.

Conclusion

The proposed methodology is simple to conduct, and allows the microscopic understanding of processing, either theoretically based or by trial and error, in terms of the supramolecular idiosyncrasies of the porous materials to be dried.

Both x_c and k_2 kinetic parameters can be used to assess diffusional barriers in porous matrices, allowing comparison amongst materials. x_c is easier to determine, and one reckons that it is by itself enough to make comparisons of mass-transfer resistance between different porous materials.

References

- Alcántara, C.M., Moreira, I.d.S., Cavalcanti, M.T., Lima, R.P., Moura, H.V., da Silva Neves, R., Cassimiro, C.A.L., Martins, J.J.A., da Costa Batista, F.R., Pereira, E.M. (2024). Mathematical modelling of drying kinetics and technological and chemical properties of *Pereskia* sp. Leaf Powders. *Processes*, 12, (10), 2077. <https://doi.org/10.3390/pr12102077>.
- Cai, J., Zhu, L., Wei, Q., Huang, D., Luo, M., Tang, X. (2023). Drying kinetics of a single biomass particle using Fick's second law of diffusion. *Processes*, 11(4), 984. <https://doi.org/10.3390/pr11040984>.
- Carter, H. G., Kibler, K. G. (1978). Langmuir-type model for anomalous moisture diffusion in composite resins. *Journal of Composite Materials*, 12(2), 118-131. <https://doi.org/10.1177/002199837801200201>.
- Conejo-Barboza, G., & Mata-Segreda, J. F. (2018). Drying kinetics as tool for the assessment of dynamic porosity of catalyst-support materials. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, article ID 901967, [Doi: 10.5171/2018.901967](https://doi.org/10.5171/2018.901967).
- Fernández-Solano, B. & Mata-Segreda, J. F. (2021). Effect of molecular structure on diffusion of alcohols through type-A zeolite pores (0.5 nm). *Journal of Materials Science and Engineering A*, 11(4–6), 48-55. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2021.4-6.003>
- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de separación*. (4.^a ed. en español). Compañía Editorial Continental, pp. 589-594.
- Inyang, U. E., Oboh, I.O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic models for drying techniques – Food materials. *Advances in Chemical Engineering & Science*, 8 (2), 27-48. <https://doi.org/10.4236/aces.2018.82003>.
- Kemp, I. C., Fyhr, B. C., Laurent, S., Roques, M. A., Groenewold, C. E., Tsotsas, E., Sereno, A. A., Bonazzi, C. B., Bimbenet, J.-J., and Kind, M. (2001). Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying technology*, 19(1), 15-34.

<https://doi.org/10.1081/DRT-100001350>.

Mata-Segreda, J. F. (2025). Evaporation kinetics of household and industrial liquids as an index for safe handling and storage. *ACS Chemical Health & Safety*, 32(2), 115-121.

<https://doi.org/10.1021/acs.chas.4c00091>.

Mora, E., González, G., Romero, P., Castellón, E. (2019). Control of water absorption in concrete materials by modification with hybrid hydrophobic silica particles. *Construction & Building Materials*, 221, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.086>.

Puente-Urbina, A., Morales-Aymerich, J. P., Kim, Y. S., & Mata-Segreda, J. F. (2016). Drying kinetics and assessment of relative energy cost for drying of woody biomasses. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, article ID 701233, <https://doi.org/10.5171/2016.701233>

Schlaich, A., Barrat, J.-L., Coasne, B. (2025). Theory and modelling of transport for simple fluids in nanoporous materials: From microscopic to coarse-grained descriptions. *Chemical Reviews*, 125 (5), 2561-2624. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00406>

Scheid, F. (1968) *Numerical analysis*. McGraw-Hill, New York, chapter 13.

Smirnov, M. S., & Lysenko, V.I. (1989). Equations of drying curves. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32 (5), 837-841. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(89\)90232-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90232-9).

Songgok, J., Bousfield, D., Ridway, C., Gane, P., Toivakka, M. (2012). Drying of porous coating: Influence of Coating Composition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(42), 13680-13685. <https://doi.org/10.1021/ie301624e>

Yiotis, A. G., Tsimpanogiannis, I. N., Stubos, A. K., & Yortsos, Y. C. (2006). Pore-network study of the characteristic periods in the drying of porous materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 297(2), 738-748. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.11.043>

Integración de materiales sostenibles en la construcción civil ante el cambio climático

Integration of sustainable materials into civil construction in the face of climate change

Gabriel Montúfar

<https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Panamá

Autor correspondiente: gabriel.montufar@up.ac.pa

Enviado: 21 de agosto de 2025. **Aceptado:** 12 de noviembre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i2.1028>

Resumen

El cambio climático, una amenaza para la humanidad, está impactando de forma directa a la infraestructura civil, ya que el incremento de eventos extremos provoca la degradación acelerada de las estructuras. La industria de la edificación, responsable de una buena parte de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, también se tiene que ver abocada a la transición hacia la edificación sostenible. Este artículo tiene como objetivo mostrar materiales innovadores y ecológicos en la construcción civil de las infraestructuras como los concretos autorreparables, cemento de arcilla calcinada y caliza, biochar en materiales cementicios, asfaltos de mezcla tibia y áridos reciclados. Se hace un análisis de las propiedades mecánicas, ambientales y medioambientales y económicas de estos materiales con base en una revisión exhaustiva de la literatura reciente, con reducción en emisiones de CO₂ y mejora de la durabilidad. Estos materiales son necesarios para mitigar el calentamiento global y alargar la vida útil de las estructuras, pues promueven la economía circular. Los resultados muestran la reducción en el impacto medioambiental sin perder propiedades o con mejora del rendimiento estructural, proponiendo una buena solución para las regiones vulnerables como Panamá. Este enfoque responde a la resiliencia al cambio climático y se alinea a los objetivos mundiales de sostenibilidad.

Palabras clave

Cambio climático, construcción, desarrollo sostenible, materiales de construcción, protección ambiental.

Abstract

Climate change, a threat to humanity, is directly impacting civil infrastructure, as the increase in extreme events causes accelerated structural degradation. The building industry, responsible for a significant portion of global greenhouse gas emissions, must also address the transition to sustainable construction. This article aims to showcase innovative and environmentally friendly materials for civil infrastructure construction, such as self-healing concrete, calcined clay and limestone cement, biochar in cementitious materials, warm-mix asphalt, and recycled aggregates. The mechanical, environmental, and economic properties of these materials are analyzed based on a comprehensive review of recent literature, with a reduction in CO₂ emissions and improved durability. These materials are necessary to mitigate global warming and extend the lifespan of structures, as they promote a circular economy. The results show a reduction in environmental impact without losing properties or with improved structural performance, proposing a good solution for vulnerable regions such as Panama. This approach responds to climate change resilience and aligns with global sustainability goals.

Keywords

Building materials, climate change, construction, environmental protection, sustainable development

Introducción

El cambio climático ha alterado drásticamente los patrones ambientales a nivel global, dando lugar a fenómenos climáticos extremos, tales como inundaciones, sequías o tormentas extremas que pueden comprometer gravemente la infraestructura civil de los países. Así las cosas, la construcción civil, que es una actividad de alto consumo de recursos naturales y de altas emisiones de gases de efecto invernadero, debe evolucionar de manera que su práctica muestre un modelo que prevenga situaciones climáticas adversas, que se adhiera a criterios ecológicos y que derive en construcciones más resilientes. Los estudios más recientes estiman, por ejemplo, que la producción de cemento convencional es responsable de aproximadamente el siete por ciento de las emisiones globales de CO₂ e invitan a replantearse la incorporación de materiales sostenibles (Abera, 2024). Estos nuevos materiales no solo tienen menos impacto ambiental, sino que también favorecen las durabilidades de las estructuras ante condiciones climáticas adversas. Es así que el uso de concretos innovadores y asfaltos ecológicos podría mejorar la durabilidad frente a la

corrosión y al deterioro en lugares tropicales como Panamá, donde la humedad y las precipitaciones son importantes. De igual manera, las nuevas alternativas de explicación de puentes, de carreteras y edificios en general se podrían probar de forma mucho más eficiente. Por ende, el propósito de este artículo será analizar el uso de los nuevos materiales para la construcción, pero sobre todo para ponerlos en práctica evaluando una serie de criterios, tales como la reducción de emisiones, propiedades mecánicas y viabilidad económica, entre otros.

Las nuevas alternativas para una construcción sostenible incluyen el uso de cementos de bajo clínker, aditivos reciclados o de origen proveniente de residuos y agregados reciclados. El estado del arte de la investigación ha demostrado que este uso puede llegar a reducir hasta un treinta por ciento de las emisiones de la producción de materiales (Uddin et al., 2025). Asimismo, de la misma forma, que aumenta la urbanización y la necesidad de infraestructura, también promueven la economía circular, ya que se hace un uso más extensivo de los residuos y de los recursos no renovables.

A lo largo del artículo se van desarrollando, mediante una serie de secciones, distintas partes como la metodología de trabajo y el desarrollo de los principales temas, discusión de los resultados y conclusiones útiles. Este afrontar los nuevos materiales para la construcción tendrá como base una mirada de la literatura científica más reciente en cuanto a los materiales en construcción y que son útiles para la mejora de la resiliencia de la construcción civil ante el cambio climático.

Desarrollo

Se realiza a continuación el análisis en profundidad de los materiales sostenibles, clasificados por categorías, cuyas características, ventajas y posibilidades de aplicación están sustentados en la evidencia científica. En esta investigación no sólo se contempla el análisis de las propias propiedades intrínsecas de cada material, sino también si se han puesto en práctica o no en proyectos reales de construcción civil, y el rol que estos materiales juegan en la mitigación de peligros climáticos como el incremento de

temperatura, la erosión del litoral o ciertos fenómenos climáticos extremos. Se estudia también el ciclo de vida de cada material a partir de la extracción de recursos hasta su disposición final, descifrándose cómo estos materiales contribuyen a la reducción de la huella del carbono y a la eficiencia energética en la cadena de suministro. En el ámbito de la construcción en un país como Panamá donde, además, la infraestructura se enfrenta a un mayor reto por la variabilidad climática, se vislumbra una oportunidad para la innovación en los diseños a favor de la adaptabilidad y la durabilidad, además de poder integrar principios de una ingeniería verde alineada con las normativas internacionales de sostenibilidad. Por último, se indica que es crucial el papel de la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, ambientalistas y creadores de políticas para sacar el mejor rendimiento a estas innovaciones.

Concretos autorreparables

Los concretos autorreparables suponen una alternativa innovadora para aumentar la sostenibilidad de estructuras sometidas a condiciones climáticas extremas. Se incluyen mecanismos que permiten la auto-reparación de fisuras y, por lo tanto, se disminuye la necesidad de hacer reparaciones y las emisiones que salen al exterior provocadas por las reparaciones (Amran et al., 2022).

Las técnicas son las siguientes: la introducción de cápsulas que contienen agentes de resana y/o bacterias que empiezan a precipitar carbonato de calcio en el momento en que se activan por la existencia de humedad o de fisuras en la estructura. Los estudios demuestran que los concretos autorreparables pueden reparar fisuras de aproximadamente un milímetro, aumentando la impermeabilidad y la resistencia a la corrosión. En ambientes con condiciones de alta humedad, como en los entornos tropicales, esta capacidad para sanar fisuras es muy importante para prevenir la humedad y, por lo tanto, el deterioro. A su vez, su integración minimiza las afectaciones al medioambiente al incrementar la vida de las estructuras, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad. Los estudios indican que la permeabilidad puede ser reducida en un sentido hasta seis veces, mediante agentes

bacterianos, aunque es necesaria una optimización de los mismos para trabajar a gran escala.

Dentro de las técnicas más prometedoras se cuentan los sistemas en micro-cápsulas, que hacen que polímeros o resinas epóxicas se liberen al romperse el sistema en micro-cápsulas, y esto genera un sellado por reacción al formar grietas. Otra forma va asociada a cristales expansivos que, al ser expuestos al agua, se expanden y tensan las fisuras. Las bacterias, como *Bacillus subtilis*, producen esporas que en contacto con los nutrientes y humedad producen calcita, un mineral que sella de forma natural las grietas. Estos mecanismos, no solo reparan los daños mecánicos, sino que además protegen frente a la penetración de cloruros y sulfatos que son abundantes en los ambientes costeros provocados por el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático.

Su uso más extendido en la práctica ha sido en puentes y presas en los que las reparaciones tradicionales suponen un elevado coste. Por ejemplo, en el caso de estructuras en zonas sísmicamente activas o que sufren inundaciones como es el caso de Panamá, los sistemas de concreto autorreparables podrían ser una forma de evitar los colapsos estructurales ya que se auto-reparan tras un evento crítico manteniendo así la integridad estructural. No obstante, persisten algunas interrogantes, como por ejemplo la compatibilidad de los mezclados con los aditivos del concreto convencional o la durabilidad de los agentes reparadores que se pueden deteriorar con el paso del tiempo. En este sentido, algunos estudios señalan que la combinación de mecanismos, como cápsulas y bacterias, rinden resultados superiores en términos de tasas de reparación, alcanzando hasta un noventa por ciento en grietas menores. La economía del concreto autorreparable es otra condicionante ya que, aunque el coste inicial es más elevado, el ahorro en el mantenimiento y la amortización de los costes secundarios puede producirse en un periodo que va de cinco a diez años, lo que hace viable su empleo en proyectos de infraestructura crítica. Finalmente, la investigación futura debe contemplar la producción a gran escala y el comportamiento de estos materiales en condiciones reales de exposición climática y por tanto la integración de los concretos autorreparables en la normativa de construcción sostenible.

Cementos de arcilla calcinada y caliza

Los finos de arcilla calcinada y caliza, específicamente los cementos LC3, constituyen una opción de bajo carbono ante el uso del tradicional cemento Portland. Con estos materiales se puede disminuir el contenido de clínker, que es la principal fuente de emisiones, haciendo uso de arcilla calcinada y caliza (Sharma et al., 2021; Kanagaraj et al., 2024).

La arcilla calcinada trabaja como puzolana, esto es, forma nuevos compuestos al reaccionar con el hidróxido de calcio, de esta forma mejoran dimensiones como resistencia y durabilidad. Varios estudios han demostrado que el LC3 puede alcanzar resistencias comparables a las del cemento convencional, pero utilizando hasta un cincuenta por ciento menos clínker, de este modo disminuyendo las emisiones en un treinta por ciento (Huang et al., 2024; Li et al., 2024).

Con respecto a su uso en morteros y concretos, el LC3 puede llegar a refinar la estructura de los poros, generando una mayor resistencia hacia iones agresivos, lo que resulta muy conveniente para obras en zonas costeras que son impactadas por el aumento del nivel del mar. La normalización de este tipo de cementos ha sido revisada por diferentes comités internacionales, lo que contribuye a su uso, aunque se requieren algunas adaptaciones relacionadas con los sulfatos para que se optimicen sus niveles de rendimiento (Kanavaris et al., 2023; Sabino et al., 2024).

La optimización multi-objetivo, que integra los aspectos de rendimiento mecánico, medioambiental y financiero, también sugiere relaciones óptimas de arcilla frente a caliza conforme a diferentes resistencias, apoyando su uso en construcciones resilientes.

Biochar en materiales cementicios

Incorporando biochar, obtenido a partir de la pirolisis de biomasa residual, en materiales cementosos se puede llegar a aumentar las propiedades mecánicas y térmicas además de lograr la fijación de carbono (Barbhuiya et al., 2024; Mensah et al., 2021).

Por su parte, este material poroso, puede llegar a reducir un 39 % de la conductividad térmica y mejorar el aislamiento de edificios sometidos a un amplio rango de temperaturas e impactos ambientales. En el caso del hormigón, adiciones que van del 1 al 5% consiguen

augmentar la resistencia a compresión y flexión, además de actuar como un curador interno para mejorar las propiedades de fraguado (Tee et al., 2023; Hylton et al., 2024).

Otros estudios demuestran que se consiguen mejoras en la durabilidad, como resistencia al fuego, reducción de la contracción, etc. A pesar de que un alto porcentaje, debido a su retención de agua, puede afectar al construido (Suarez-Riera et al., 2024; Zhang et al., 2022). El biochar apunta a la neutralidad de carbono, fijando hasta 2.2 kg de CO₂ por kg de biochar producido, por lo que puede hacerse su uso en el ámbito de la sostenibilidad de la construcción.

El anterior párrafo presenta el contenido de la Tabla 1 que evidencia una comparación entre las propiedades mecánicas de los cementos tradicionales y de los cementos con el biochar. Esta tabla presenta los distintos valores medidos como la resistencia a compresión, la conductividad térmica, etc., que se encuentran en la base de las revisiones realizadas (Mensah et al., 2021; Tee et al., 2023).

Tabla 1. Comparación de propiedades mecánicas de cementos tradicionales y con adición de biochar.

Propiedad	Cemento tradicional	Con 2 % biochar	Con 5 % biochar	Referencia
Resistencia a compresión (MPa, 28 días)	50-60	55-65	45-55	(Mensah et al., 2021)
Resistencia a flexión (MPa)	5-7	6-8	5-7	(Tee et al., 2023)
Conductividad térmica (W/mK)	1.0-1.5	0.8-1.0	0.6-0.8	(Zhang et al., 2022)
Reducción de emisiones (%)	0	10-15	20-25	(Barbhuiya et al., 2024)

La tabla 1 muestra las variaciones en propiedades mecánicas por la incorporación de biochar en distintas proporciones donde se observan mejoras en resistencia y reducción térmica, que denotan el potencial para aplicaciones en construcciones energéticamente

eficientes. Estos datos cuantitativos proponen comparaciones mediante resultados y evidencian como cuantificaciones adecuadas potencian los resultados sin provocar el fallo estructural al otorgar firmeza a su uso en aplicaciones donde primen los objetivos de adaptación al cambio climático.

Asfaltos de mezcla tibia y pavimentos reciclados

Los asfaltos de mezcla tibia presentan temperaturas de preparación mucho más bajas, disminuyendo el consumo energético, así como las emisiones (Belc et al., 2021; Martinez-Soto et al., 2023), y aditivos típicos como zeolita o lignina proporcionan un mejor rendimiento, con impactos ambientales que se reducen del diez al quince por ciento (Shi & Xu, 2023). El uso de pavimentos reciclados incorpora, a su vez, agregados de un asfalto ya recuperado, reduciendo la extracción de recursos vírgenes y las emisiones de gases de efecto invernadero (Gruber et al., 2023; Vega et al., 2020). El ciclo de vida de los propios pavimentos reciclados muestra importantes beneficios ambientales en el caso del calentamiento global, mejorados con la introducción de lignina biomasa forestal, que a su vez mejora la resistencia al surcado, y reduce el coste (Gaudenzi et al., 2023; Pascoal et al., 2023). Asimismo, en las propias carreteras, estos tipos de materiales incrementan su vida útil, ya que se comportan mejor frente a cargas climáticas como el calor.

La tabla 2 hace una comparación entre los asfaltos tradicionales y los asfaltos de mezcla tibia con reciclados; esta tabla aborda las categorías de las emisiones de carbono y el consumo energético, y que son desarrolladas mediante evaluaciones del ciclo de vida (Belc et al., 2021; Martinez-Soto et al., 2023).

Tabla 2. Impactos ambientales de asfaltos tradicionales y de mezcla tibia con agregados reciclados.

Categoría ambiental	Asfalto tradicional	Asfalto tibia con 20% reciclado	Asfalto tibia con 30% reciclado	Referencia
Emisiones de CO2 (kg eq/t)	50-60	40-50	35-45	(Belc et al., 2021)
Consumo energético (MJ/t)	300-400	250-300	200-250	(Martinez-Soto et al., 2023)
Potencial de acidificación (kg SO2 eq/t)	0.2-0.3	0.15-0.2	0.1-0.15	(Gruber et al., 2023)
Reducción global (%)	0	10-15	20-25	(Vega et al., 2020)

La tabla 2 muestra cuantificados los beneficios ambientales de la mezcla tibia de asfaltos con distintos porcentajes de reciclados, como la disminución de emisiones y de energía utilizada, poniendo de manifiesto su aportación a la sostenibilidad en las pavimentaciones; además, estos indicadores permiten la evaluación de viabilidad, pues mayores porcentajes de reciclados incrementan los ahorros y fomentan su aplicación en infraestructuras viales en áreas climatológicamente variables. La tabla 2 indica que el asfalto tradicional (conocido como hot-mix asphalt o HMA) es el asfalto que se obtiene, a partir de agregados vírgenes (grava gruesa ~17-38%, grava fina ~29-38 %, arena ~25-44%, filler ~1 %) y ligante asfáltico virgen (~5 %), a altas temperaturas (154-160 °C) sin la adición de aditivos ni reciclados; el asfalto de mezcla tibia con 20 % reciclado (warm-mix asphalt o WMA) es el asfalto que se logra a bajas temperaturas (134-144 °C) mediante la adición de, por ejemplo, componentes como zeolita (~0.6 %) o Evotharm® (~0.5 %) con la adición de ~70-80 % de agregados vírgenes ajustados tal y como mencionan y un 20 % de RAP (reclaimed asphalt pavement, una mezcla que se compone de ~5 % de ligante reutilizado y ~95 % de agregados); por último el asfalto de mezcla tibia con 30 % reciclado, que pone en práctica la metodología

conocida en el que usa ~60-70 % de agregados vírgenes y el 30 % de RAP, pero que manifiesta una reducción del uso de los recursos vírgenes. Cabe indicar que estos resultados son los obtenidos por las diferentes evaluaciones de ciclo de vida referenciadas (Belc et al., 2021; Martínez-Soto et al., 2023; Gruber et al., 2023; Vega et al., 2020), pues las distintas versiones modificadas con reciclados y aditivos manifiestan el menor de los resultados en cuanto a emisiones y consumo energético, al igual que en acidificación, por lo que son una buena oportunidad de poder realizar una buena práctica en cuanto a sostenibilidad en las pavimentaciones.

Agregados reciclados

Los agregados reciclados de residuos de construcción disminuyen la demanda de materias primas vírgenes, lo que favorece la circularidad (Mascarenhas et al., 2023; Lei et al., 2022). Estas evaluaciones indican que la producción con aglomerados reciclados presentaría emisiones menores, pero altamente dependientes de su distancia de transporte (Linares et al., 2024).

Dichos materiales pueden preservar propiedades mecánicas adecuadas en el concreto, podrían contribuir a la resiliencia climática dado que implicarían una reutilización de recursos locales. De hecho, el uso de agregados finos reciclados en morteros de concreto podría redundar en una reducción de las emisiones de carbono de hasta un 20 %, tal como lo reflejan los análisis de ciclo de vida que acotan las fases de estudio desde la demolición hasta la mezcla final. Además, en regiones donde la producción de residuos de construcción es elevada, caben considerar las zonas urbanas en expansión, los agregados reciclados permiten reducir las cantidades de residuos acumulados, transformándolos en una materia prima para la elaboración de componentes valiosos en las estructuras. La literatura ha puesto en presente que, aunque la circulación de agua es mayor en los granulados reciclados, tratamientos como la saturación o aditivos y adiciones de mezcla permitirían igualar el rendimiento de un agregado natural y mejorar su resistencia frente a ciclos de congelación-descongelación, típicos de zonas vulneradas por el cambio climático. Estas incorporaciones a los pavimentos y edificios permitirían ahorrar materias primas no

renovables y también reducir costes operativos en el largo plazo, lo que generaría mayores economías locales sostenibles. En último término, la variabilidad geográfica de la calidad de los residuos necesitaría de normativas subyacentes que fijen criterios de uniformidad, que posibiliten que estos materiales puedan manifestar los niveles de durabilidad en entornos vulnerables.

Análisis del tema

No obstante, esta ventaja de la combinación de estos materiales con valores de reducción de emisión y una óptima durabilidad a los efectos de su aplicación queda contrarrestada por las barreras que deben hacer frente a altas inversiones iniciales y la necesidad de homologación. Para lugares como Panamá, donde la vulnerabilidad ha de ser entendida en el contexto del cambio climático en el que nos encontramos, el empleo de estos materiales es esencial, pero debe ser complementario de una investigación más avanzada de las aplicaciones de cada uno.

A modo de comparación, el biochar y LC3 son completos con un uso de valor positivo, a la vez que el asfalto reciclado los potencia mientras realiza un uso positivo de los recursos. Estas ventajas han sido cuantificadas a través de tablas para consolidar la viabilidad. Es importante señalar la dimensión del aspecto socioeconómico, en la medida en que la adopción de estos materiales podría generar puestos de trabajo en la cadena de reciclaje, además de incorporación de empleo para la producción más ecológica, pero requiere de formación para las personas de trabajo tradicional. La cadena de suministro puede incluir brechas como la de suministro de biomasa para biochar como la de arcilla para LC3, que podría establecerse como una brecha en el proceso secuencial en los países en vías de desarrollo, sugiriendo que hay que desarrollar políticas que alienten las inversiones en términos de infraestructura verde. Los beneficios a largo plazo (menores costes de mantenimiento) y mayores resiliencias ante desastres climáticos superan las barreras iniciales, en la medida que bien se alinean con los acuerdos internacionales, como sería el Acuerdo de París. Se requieren futuras investigaciones para las pruebas de experimentos

de campo integrados que evalúen el rendimiento conductor bajo proyecciones de clima que den una validación de estos materiales en todo un espectro geográfico y cultural.

Para hacer la discusión más robusta en la tabla 3 se incorpora un análisis comparativo más extenso de los cinco materiales que hemos expuesto (concretos autorreparables, cementos de arcilla calcinada y caliza (LC3), biochar en materiales cementicios, asfaltos de mezcla tibia y agregados reciclados). Se presenta una tabla con criterios comparativos que directamente se ve la contraposición de estos materiales en base a parámetros como coste inicial vs. ahorros en el largo plazo, madurez tecnológica (listo para el mercado vs. experimental), facilidad de implementación y mayor impacto de reducción de carbono. Los datos presentados son tomados de la revisión de literatura citada en el documento (por ejemplo, Amran et al., 2022; Sharma et al., 2021; Barbhuiya et al., 2024; Belc et al., 2021; Mascarenhas et al., 2023).

Tabla 3. Análisis comparativo de los materiales sostenibles

Material	Costo inicial vs. ahorro a largo plazo	Madurez tecnológica	Facilidad de implementación	Mayor impacto en reducción de carbono
Concretos autorreparables	Costo inicial alto (debido a agentes como cápsulas o bacterias); ahorro a largo plazo en mantenimiento (5-10 años de amortización, según Amran et al., 2022)	En fase experimental a semi-comercial (pruebas en puentes y presas, pero optimización pendiente)	Media (requiere ajustes en mezclas convencionales; compatibilidad variable)	Medio (reduce emisiones indirectas por mayor durabilidad, pero no detallado en % directo)
Cementos LC3	Costo inicial moderado (menor clínker); ahorro a largo plazo por durabilidad mejorada (reducción 30 % en emisiones, según Sharma et al., 2021)	Lista para el mercado (normalización internacional en curso, Kanavaris et al., 2023)	Alta (compatible con procesos existentes; requiere adaptaciones mínimas)	Alto (hasta 30-50 % menos clínker, reducción directa de CO ₂)

	y Kanagaraj et al., 2024)			
Biochar en materiales cementicios	Costo inicial bajo-moderado (biomasa residual); ahorro a largo plazo por fijación de carbono y menor mantenimiento (reducción 20-25 % emisiones con 5 %, según Barbhuiya et al., 2024)	Semi-comercial (pruebas experimentales positivas, pero optimización en dosis, Mensah et al., 2021)	Media (adición simple, pero afecta fraguado si >5 %; Tee et al., 2023)	Alto (fija hasta 2.2 kg CO ₂ /kg; reducción 10-25 %, Zhang et al., 2022)
Asfaltos de mezcla tibia	Costo inicial moderado (aditivos como zeolita); ahorro a largo plazo por menor energía (reducción 20-25 % global, según Belc et al., 2021 y Martinez-Soto et al., 2023)	Lista para el mercado (usos extendidos en pavimentos)	Alta (temperaturas más bajas facilitan producción; compatible con reciclados)	Medio-alto (10-25 % menos emisiones y energía, Gruber et al., 2023)
Agregados reciclados	Costo inicial bajo (reutilización de residuos); ahorro a largo plazo por menor extracción (reducción 20 % emisiones, según Mascarenhas et al., 2023 y Lei et al., 2022)	Lista para el mercado (ampliamente usado, pero depende de calidad local)	Media-alta (tratamientos para igualar propiedades; distancia de transporte clave, Linares et al., 2024)	Medio (menor demanda de vírgenes; impacto variable por transporte, no detallado en % fijo)

Este contraste pone de manifiesto que entre los cementos LC3 y asfaltos de mezcla tibia están entre aquellos con alta madurez y facilidad, que serían ideales para una pronta adopción en algunas regiones vulnerables como Panamá, mientras que el resto de elementos de interés, los concretos autorreparables, presentan un gran potencial en cuanto a resiliencia, pero su desarrollo implica un proceso más largo. El biochar es altamente

efectivo en incentivación de reducción de carbono, pero su aplicación debe ser equilibrada con características mecánicas.

Sin embargo, las barreras son más allá del costo y estandarización: el conocimiento técnico en la industria es escaso (muchos ingenieros y constructores que no están expuestos a las mezclas innovadoras deberían recibir entrenamiento extenso); resistencia a los cambios por parte de los constructores (preferencia por métodos tradicionales que han sido probados, por miedo a que no van a funcionar), y la falta de políticas e incentivos gubernamentales (por ejemplo, subsidios, regulaciones obligatorias o créditos fiscales que podrían permitir la transición a alcanzar objetivos globales, pero que nunca han existido en contextos como Panamá). Estas son algunas de las barreras que, si no se resuelven, podrían limitar el escalado; abogo a favor de integralidad en políticas, dado que hay suficiente evidencia en la literatura que muestra que los beneficios ambientales y económicos superan los riesgos, y en ausencia de un apoyo sistémico, la adopción tardará.

Análisis costo-beneficio

A pesar de que el artículo se pronuncia sobre la viabilidad económica de los materiales sostenibles, no presenta datos específicos sobre los costos. Para reforzar el argumento a favor de su adopción, se comparte el resultado del análisis de costo-beneficio. Este análisis tiene como base la literatura revisada y consiste en comparar los costos iniciales en relación con los ahorros a largo plazo en tanto que los costos tienen como objetivo buscar reducciones de emisiones, mantenimiento y producción.

Concretos autorreparables: Su coste inicial es elevado debido a los agentes, como las cápsulas o las bacterias, que pueden llegar a tener un coste de 10-30% mayor que el concreto tradicional, según Amran et al. (2022). Sin embargo, los ahorros en mantenimiento amortizan la inversión inicial en un periodo de 5-10 años, como muestran sus reducciones de costos de reparación que pueden llegar a ser de un 50 % además de una durabilidad mayor (Amran et al., 2022).

Cementos LC3: Los costes de producción pueden llegar a ser hasta un 25 % por debajo del cemento Portland dado el menor clínker y energía Sharma et al. (2021). Disminución de

emisiones de CO₂ del 30-40 %, con beneficios económicos a largo plazo a partir de durabilidad comparable o superior (Sharma et al., 2021; Kanagaraj et al., 2024).

Biochar en materiales cementosos: costo inicial bajo o moderado (biomasa residual), con disminuciones en emisiones del 10-25 % y fijación del carbono (2.2 kg CO₂/kg, Zhang et al., 2022); ahorros por beneficios en el aislamiento térmico y mantenimiento hacen que en el tiempo sea ventajoso, con costes que disminuyen aproximadamente 1 USD por cada 0.25 % de incorporación de biochar (Barbhuiya et al., 2024).

Asfaltos de mezcla tibia: moderado coste inicial (aditivos aportan de 2 a 4 USD por tonelada), aunque existe un ahorro de energía (20-30 % menos) y de emisiones (10-15 %) que lo superan rápidamente (Belc et al., 2021). Se obtienen beneficios netos en el ciclo de vida, con reducciones totales de costes de hasta el 14% al incorporar material reciclado (Martinez-Soto et al., 2023). Agregados reciclados: Más barato de producir que los agregados vírgenes (un poco más costo-efectivos, derivando en precios 0-10 % más caros para concreto reciclado en cierta medida, pero más barato en el otro sentido) con emisiones reducidas hasta un 20 %, y también en extracción y residuos (Mascarenhas et al., 2023; Lei et al., 2022).

Estos datos provienen del hecho de que, a pesar de los costes iniciales diferentes, los beneficios futuros superan esas inversiones porque favorecen la adopción en contextos vulnerables.

Revisión de las normativas y criterios existentes

El artículo propone políticas sin describir cuál era la situación de la normativa vigente; aquí se considera la revisión de las normativas internacionales de la construcción sostenible junto a la adecuación de estos materiales para facilitar la adopción de los mismos.

Las certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) también fomentan la utilización de esos materiales en el contexto de la sostenibilidad. El LEED otorga créditos en categorías como "Materiales y Recursos" derivado del uso de materiales reciclados (por ejemplo, los agregados reciclados, los asfaltos tibios contribuyen a puntos como contenido

reciclado y la reducción de emisiones) y en "Energía y Atmósfera" por eficiencia (por ejemplo, con el biochar para aislamiento térmico) y el BREEAM evalúa en "Materiales" y en "Energía" otorgando reconocimiento a la reducción del CO₂, y análisis de ciclo de vida; específicamente, el LC3 y los concretos auto-reparantes suman puntos por durabilidad y bajo impacto. De manera particular para el LC3, los estándares como RILEM (Kanavaris et al., 2023) son útiles para su normalización, alineándose con las normas de certificación europeas de los cementos de bajo clínker. Por la parte de los materiales, asfaltar reciclados pueden acceder a la normativa de la UE de la economía circular. La escasez de estímulos por parte de los gobiernos en países como Panamá merma la adopción, por lo que las recomendaciones apuntan a la integración de incentivos en normativas locales en forma de subsidios o mandatos.

Ejemplos prácticos

A fin de realizar un componente práctico se resume brevemente uno o dos casos de implementación a gran escala estimulados por la reciente literatura.

Proyecto de infraestructura vial con mezclas de asfaltos reciclados en Europa: El proyecto Re-Road (UE, 2008-2012) tuvo como objetivo reducir el uso de asfalto reciclado en capas de rodadura de las autopistas, con un uso de hasta 99 % de material reciclado en mezclas calientes. Los resultados indicaron que había reducciones de emisiones en 20-30 % para las mezclas con asfalto reciclado y unos costos similares o inferiores a los de los usados habitualmente, además de durabilidad equivalente para la mayoría de las capas rodantes; se aplicó en secciones de carreteras en varios países, evitándose colapsos y fomentando la circularidad.

Construcción con cemento LC3 en India: Los pilotos en India (2016-2019) produjeron cemento LC3 a escala industrial, usado principalmente en bloques de pavimentación y construcciones de vivienda. Mostró resistencias comparativas en 2-10 % superiores a las del cemento Portland así como reducciones de CO₂ en 30-40 %; por ejemplo, en productos de construcción, mejoró la fuerza y la viabilidad económica con respecto a los códigos locales.

Estos casos demuestran la aplicabilidad real del contenido, validando una serie de beneficios en contextos similares al de Panamá.

Impacto social

El presente análisis se centra en aspectos ambientales, mecánicos y económicos; en este punto también se añade un breve comentario sobre impactos sociales.

La adopción de estos materiales promueve la economía circular creando trabajos en todo lo que se refiere al reciclado (e.g., agregados y asfaltos reciclados) y en términos de producción (e.g., biochar de biomasa residual) estimando hasta 50 veces más trabajos en el caso de reciclaje y 200 veces más empleos en el caso de reparación con respecto a los vertederos, con un potencial de 1.8 millones de trabajos en EE.UU. que se podrán conseguir conforme se vayan implementando prácticas circulares de aquí a 2030 (extrapolables a nivel global). También mejora la calidad de vida ya que se generan infraestructuras más duraderas y seguras y se disminuyen los riesgos ante el clima, especialmente en regiones vulnerables (e.g., en Panamá) al igual que la justicia porque se aprovechan recursos recurrentemente disponibles en cada contexto. No obstante, se requiere formación a los trabajadores tradicionales para que se disminuyan la resistencia a los cambios.

Conclusión

La incorporación de estos materiales sostenibles en la construcción civil es clave para limitar el cambio climático al reducir emisiones de CO₂ y al mismo tiempo mejorar la resiliencia de las infraestructuras. De los materiales que hemos revisado, los cementos de arcilla calcinada y caliza (LC3) son los que ofrecen mayor reducción de emisiones (30-50 %) gracias a la disminución de clínicas (Sharma et al., 2021; Kanagaraj et al., 2024); los cementos con biochar son los que fijan más CO₂ (2.2 kg de CO₂ por kg de biochar producido) y ofrecen una reducción de las emisiones de 10-25 % (Barbhuiya et al., 2024; Zhang et al., 2022). En comparación estos también superan a las opciones de los concretos autorreparables (impacto intermedio, indirecto por durabilidad) o los asfaltos de mezcla tibia (reducción de 10-25 %) (Amran et al., 2022; Belc et al., 2021).

La priorización de su implementación en zonas vulnerables como Panamá optimiza el balance entre sostenibilidad ambiental y propiedades mecánicas. Se consideran necesarias políticas públicas orientadas a la investigación, formación e inter-sectores academia-industria-gobierno, que integren el uso de estos materiales en las normativas nacionales de infraestructura con el fin de construir infraestructuras resilientes ante eventos climáticos extremos, crecimiento económico y resiliencia intergeneracional, alineados con los objetivos de desarrollo sostenible. Algunas líneas futuras de investigación son pruebas de larga duración en autorreparables para ciclos de corrosión costera (Amran et al., 2022); análisis de ciclo de vida de asfaltos de mezcla tibia con lignina local (Gaudenzi et al., 2023; Pascoal et al., 2023).

Referencias

- Abera, Y. A. (2024). Sustainable building materials: A comprehensive study on eco-friendly alternatives for construction. *SAGE Open Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1177/26349833241255957>
- Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., & Rashid, R. S. M. (2022). Self-healing concrete as a prospective construction material: A review. *Materials*, 15(9), 3214. <https://doi.org/10.3390/ma15093214>
- Barbhuiya, S., Das, B. B., & Kanavaris, F. (2024). Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859>
- Belc, A. L., Ciutina, A., Buzatu, R., Belc, F., & Costescu, C. (2021). Environmental impact assessment of different warm mix asphalts. *Sustainability*, 13(21), 11869. <https://doi.org/10.3390/su132111869>
- Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. *Construction and Building Materials*, 362, 129773. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773>
- Gruber, M. R., & Hofko, B. (2023). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled asphalt pavement production. *Sustainability*, 15(5), 4629. <https://doi.org/10.3390/su15054629>
- Huang, G., Liu, Y., Benn, T., Luo, L., Xie, T., & Zhuge, Y. (2024). A comprehensive framework for the design and optimisation of limestone-calcined clay cement: Integrating mechanical, environmental, and financial performance. *Journal of Composites Science*, 8(12), 524. <https://doi.org/10.3390/jcs8120524>
- Hylton, J., Huguen, A., Rowland, S. M., Griffin, M., & Tunstall, L. E. (2024). Relevant biochar characteristics influencing compressive strength of biochar-cement mortars. *Biochar*, 6,

87. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00375-6>
Kanagaraj, B., Anand, N., Alengaram, U. J., Samuvel Raj, R., & Karthick, S. (2024). Limestone calcined clay cement (LC3): A sustainable solution for mitigating environmental impact in the construction sector. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 21, 200197. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200197>
- Kanavaris, F., Vieira, M., Bishnoi, S., et al. (2023). Standardisation of low clinker cements containing calcined clay and limestone: A review by RILEM TC-282 CCL. *Mater Struct*, 56, 169. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02257-y>
- Lei, B., Yu, L., Chen, Z., Yang, W., Deng, C., & Tang, Z. (2022). Carbon emission evaluation of recycled fine aggregate concrete based on life cycle assessment. *Sustainability*, 14(21), 14448. <https://doi.org/10.3390/su142114448>
- Li, Y., Li, Y., Ma, H., & Li, J. (2024). The hydration, microstructure, and mechanical properties of vaterite calcined clay cement (VC3). *Cement and Concrete Research*, 175, 107374. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107374>
- Linares, R., López-Uceda, A., Piccinali, A., Martínez-Ruedas, C., & Galvín, A. P. (2024). LCA applied to comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 44023–44035. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33868-9>
- Martinez-Soto, A., Calabi-Floody, A., Valdes-Vidal, G., Hucke, A., & Martinez-Toledo, C. (2023). Life cycle assessment of natural zeolite-based warm mix asphalt and reclaimed asphalt pavement. *Sustainability*, 15(2), 1003. <https://doi.org/10.3390/su15021003>
- Mascarenhas, Z. M. G., Piao, Z., Vasconcelos, K. L., Poulikakos, L. D., & Bernucci, L. L. B. (2023). Comparative environmental performance of pavement structures considering recycled materials and regional differences. *Science of the Total Environment*, 858, 159862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159862>
- Mensah, R. A., Shanmugam, V., Narayanan, S., Razavi, N., Ulfberg, A., Blanksvärd, T., Sayahi, F., Simonsson, P., Reinke, B., Försth, M., Sas, G., Sas, D., & Das, O. (2021). Biochar-added cementitious materials—A review on mechanical, thermal, and environmental properties. *Sustainability*, 13(16), 9336. <https://doi.org/10.3390/su13169336>
- Pascoal, A., Almeida, A., Capitão, S., & Picado-Santos, L. (2023). Improvement of warm-mix asphalt concrete performance with lignin obtained from bioethanol production from forest biomass waste. *Materials*, 16(23), 7339. <https://doi.org/10.3390/ma16237339>
- Sabino, T. D. de M. M., Nunes, U. S., Marinho, G. S., de Oliveira Freitas, J. C., Martinelli, A. E., & Vieira da Nóbrega, A. C. (2024). Limestone calcined clay cement (LC³) coating mortars as an energy-efficient option for construction. *Construction and Building Materials*, 437, 136954. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136954>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., & Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Shi, X., & Xu, T. (2023). Physicochemical properties of enzymatic hydrolysis lignin-modified bitumen and its modification mechanism. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2290094>



- Suarez-Riera, D., Lavagna, L., Carvajal, J. F., Tulliani, J.-M., Falliano, D., & Restuccia, L. (2024). Enhancing cement paste properties with biochar: Mechanical and rheological insights. *Applied Sciences*, 14(6), 2616. <https://doi.org/10.3390/app14062616>
- Tee, K. F., Kamini, G. P., & Gimbun, J. (2023). Biochar in cementitious material—A review on physical, chemical, mechanical, and durability properties. *AIMS Materials Science*, 10(3), 405–425. <https://doi.org/10.3934/matensci.2023022>
- Uddin, M. A., Shahabuddin, M., Jameel, M., Rahman, M., Hosen, M. A., & Alanazi, F. (2025). Sustainable construction practices in urban areas: Innovative materials, technologies, and policies to address environmental challenges. *Energy and Buildings*, 341, 115831. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115831>
- Vega A., D. L., Santos, J., & Martinez-Arguelles, G. (2020). Life cycle assessment of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for road pavements construction. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(4), 923–936. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1778694>
- Zhang, Y., He, M., Wang, L., Yan, J., Ma, B., Zhu, X., Ok, Y. S., Mechtcherine, V., & Tsang, D. C. W. (2022). Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar*, 4, 59. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00182-x>



Generación de aromas y sabores en alimentos: una revisión de sus principales rutas metabólicas

Generation of Aromas and Flavors in Foods: A Review of Their Main Metabolic Pathways

Cristel Santamaría

<https://orcid.org/0009-0000-6120-4224>

Dionicio Rodríguez

<https://orcid.org/0009-0000-8037-7067>

Andrea Polo

<https://orcid.org/0009-0003-4292-6012>

Byron Álvarez

<https://orcid.org/0009-0003-1351-0149>

Universidad Autónoma de Chiriquí, Maestría en Ciencias Químicas con Énfasis en Inocuidad Alimentaria, Centro de Investigación de Productos Naturales y Biotecnología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas.

Autor correspondiente: cristel.santamaria@unachi.ac.pa

Enviado: 4 de agosto de 2025. **Aceptado:** 21 de noviembre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i1.994>

Resumen

Los metabolitos bioactivos, desempeñan un papel esencial en la calidad sensorial de los alimentos, influyendo en su color, aroma, sabor y aportando beneficios para la salud. En frutas y verduras, no solo determinan el dulzor, sino que también participan en procesos metabólicos y de regulación genética, modificando la calidad y las características organolépticas. La conversión de aminoácidos en compuestos volátiles y aromáticos, mediada por el etileno, es clave en el desarrollo de perfiles sensoriales. Asimismo, los ácidos grasos, mediante enzimas como lipoxigenasas y alcohol deshidrogenasas, se transforman en aldehídos, cetonas y ésteres que aportan aromas y sabores distintivos, mientras que los terpenos y carotenoides contribuyen a la pigmentación y el aroma característico de muchas especies vegetales. Por otro lado, existen rutas que generan compuestos distintivos, como la reacción de Maillard y la degradación térmica de lípidos. Estos procesos dan lugar a moléculas, como pirazinas, pirroles, piridinas, aldehídos, cetonas, alcoholes y ésteres, que enriquecen la complejidad sensorial de los alimentos procesados. Además, la variabilidad en la producción de estos compuestos entre diferentes frutas y verduras, junto con la interacción entre lípidos y productos de la reacción de Maillard, sigue siendo un área de gran interés. En este contexto, profundizar en el conocimiento de las rutas biosintéticas involucradas y optimizar su regulación permitirá mejorar la calidad y estabilidad de los compuestos aromáticos y bioactivos en los alimentos. La integración de enfoques biotecnológicos y analíticos es clave para potenciar los beneficios sensoriales y

nutricionales, promoviendo un mejor aprovechamiento de estos metabolitos en la industria alimentaria.

Palabras clave

Alimentos, aromas, compuestos volátiles, reacción de Maillard, sabor.

Abstract

Bioactive metabolites play an essential role in the sensory quality of foods, influencing their color, aroma, flavor, and providing health benefits. In fruits and vegetables, they not only determine sweetness but also participate in metabolic and genetic regulation processes, modifying quality and organoleptic characteristics. The conversion of amino acids into volatile and aromatic compounds, mediated by ethylene, is crucial for the development of sensory profiles. Likewise, fatty acids, through enzymes such as lipoxygenases and alcohol dehydrogenases, are transformed into aldehydes, ketones, and esters that impart distinctive aromas and flavors, while terpenes and carotenoids contribute to pigmentation and the characteristic aroma of many plant species. On the other hand, there are pathways that generate distinctive compounds, such as the Maillard reaction and the thermal degradation of lipids. These processes give rise to molecules such as pyrazines, pyrroles, pyridines, aldehydes, ketones, alcohols, esters, which enrich the sensory complexity of processed foods. Furthermore, variability in the production of these compounds among different fruits and vegetables, along with the interaction between lipids and Maillard reaction products, remains an area of great interest. In this context, deepening the understanding of the biosynthetic pathways involved and optimizing their regulation will enhance the quality and stability of aromatic and bioactive compounds in foods. The integration of biotechnological and analytical approaches is key to boosting sensory and nutritional benefits, promoting better utilization of these metabolites in the food industry.

Keywords

Aromas, foods, Maillard reactions, taste, volatile formation.

Introducción

La generación de aromas y sabores en frutas y vegetales es un proceso complejo que involucra múltiples rutas biosintéticas y mecanismos moleculares. Conocer en profundidad algunas de las rutas metabólicas que generan estos compuestos ofrece oportunidades significativas para mejorar la calidad alimentaria, desarrollar nuevos productos y optimizar procesos de producción de manera más sostenible y eficiente.

Por lo cual esta revisión se centra en analizar y determinar las principales rutas responsables de la generación de sabores y olores en los alimentos, un tema clave para comprender los

mecanismos bioquímicos que contribuyen a estas propiedades sensoriales. En primera instancia, indagaremos en la conversión de azúcares de frutas y vegetales, lo cual es de relevancia debido a su función como metabolitos que regulan muchos aspectos del metabolismo, entre ellos, el desarrollo y expresión de genes, generando sabores dulces (Hernández-Bernal et al., 2022 y Vázquez-Cuecuecha et al., 2023)

Asimismo, los ácidos grasos, mediante la lipólisis y la oxidación, generan alcoholes, aldehídos y cetonas, componentes clave en los aromas y sabores fuertes y suaves (Shahidi y Hossain, 2022). Además, los terpenos contribuyen con notas florales y cítricas, como en el té verde (Qin et al., 2024). Mientras que los carotenoides, como los encontrados en tomates y zanahorias, se descomponen para formar compuestos volátiles como iononas, que añaden notas dulces y afrutadas (Mele et al., 2020). Por otro lado, los aminoácidos, además de ser precursores de compuestos nitrogenados y sulfurados esenciales en el perfil de sabor, participan en la reacción de Maillard para generar volátiles específicos como pirazinas y tioles (Liu et al., 2022).

Por lo tanto, el tratamiento térmico, a través de reacciones como Maillard y la oxidación de lípidos, es crucial para la generación de compuestos aromáticos y de sabor, mejorando el perfil sensorial y afectando la estabilidad y liberación de compuestos (Troise et al., 2020). Los azúcares, como la glucosa y la fructosa, son esenciales en las reacciones de Maillard, donde reaccionan con aminoácidos para formar compuestos que aportan aromas tostados y sabores complejos (Arias-Giraldo y López-Velasco 2019).

Este conocimiento permitirá ajustar procesos para realzar perfiles sensoriales, desarrollar alimentos con beneficios para la salud y crear tecnologías de procesamiento innovadoras. Sin embargo, la complejidad de estas rutas, la variabilidad genética y ambiental, y la necesidad de técnicas analíticas avanzadas son desafíos que deben abordarse.

Materiales y Métodos

El presente trabajo se desarrolló bajo el enfoque de una revisión con el objetivo de sintetizar y analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre las principales rutas

metabólicas involucradas en la generación de aromas y sabores en alimentos. Para la búsqueda de información se consultaron las siguientes bases de datos científicas: Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect, PubMed y Google Scholar. Estas plataformas fueron seleccionadas por su amplio alcance en literatura revisada por pares en el área de ciencias de los alimentos, bioquímica y biotecnología.

Los términos de búsqueda se definieron en español e inglés, combinando palabras clave, entre ellas: aromas, sabores, compuestos volátiles, metabolitos secundarios, rutas metabólicas, reacción de Maillard, flavor formation, aroma compounds, plant secondary metabolites, Maillard reaction, y lipid oxidation. Se priorizaron artículos publicados entre los años 2005 y 2025, con el fin de incluir estudios recientes sin excluir investigaciones clásicas relevantes.

Los criterios de inclusión fueron:

1. Artículos originales y de revisión publicados en revistas científicas indexadas,
2. Estudios relacionados con la biosíntesis de compuestos aromáticos en frutas, vegetales y alimentos procesados
3. Investigaciones que abordaran rutas metabólicas asociadas a azúcares, aminoácidos, ácidos grasos, terpenos y carotenoides, así como procesos térmicos como la reacción de Maillard.

Como criterios de exclusión, se descartaron trabajos que no presentaran conexión directa con el desarrollo de aromas y sabores en alimentos o aquellos con información insuficiente para su análisis comparativo.

Finalmente, la selección de los artículos se realizó en tres etapas:

- i) Revisión de títulos y resúmenes,
- ii) Lectura del texto completo,
- iii) Análisis de pertinencia científica y coherencia con los objetivos de la revisión.

La información seleccionada se organizó y sistematizó según el tipo de ruta metabólica (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y terpenos/carotenoides) y según los procesos térmicos involucrados, permitiendo una integración coherente con el desarrollo temático

del presente artículo.

Desarrollo

1. Biosíntesis

Los metabolitos bioactivos en los alimentos, como los pigmentos, metabolitos secundarios, y los fitoquímicos contribuyen a las propiedades sensoriales, ellos confieren beneficios a la salud, y además imparten color, aroma, y sabor a las comidas, y enmascaran olores o sabores indeseables (Pavagadhi et al., 2020 y Diez-Simon et al., 2019). En este contexto, se destacan algunos metabolitos secundarios de relevancia y sus funciones (figura 1). Por ejemplo, el eugenol, responsable del aroma del clavo y la albahaca; la curcumina, un pigmento característico de la cúrcuma, y compuestos como la capsaicina (responsable del picante en el ají) están relacionados con las rutas de los shikimatos, derivados de fenilpropanoides (Chempakam y Ravindran, 2023; Deryabin et al., 2019; Chumroenphat et al., 2019 y Huang et al., 2021). Por otro lado, la alicina, el principio activo del ajo, se origina en la vía de biosíntesis de los glucosinatos, generan un sabor picante (Gulsen et al., 2024). Finalmente, los ácidos fenólicos (clorogénico, gálico y ferúlico), comunes en muchas especies, también derivan de estas rutas, particularmente a partir de los intermediarios relacionados con fenoles y quinonas (Marchiosi et al., 2020). Esta relación ilustra cómo las rutas metabólicas de metabolitos primarios, como el ciclo de Krebs y los shikimatos, están estrechamente conectadas con la biosíntesis de metabolitos secundarios de importancia biológica y ecológica.

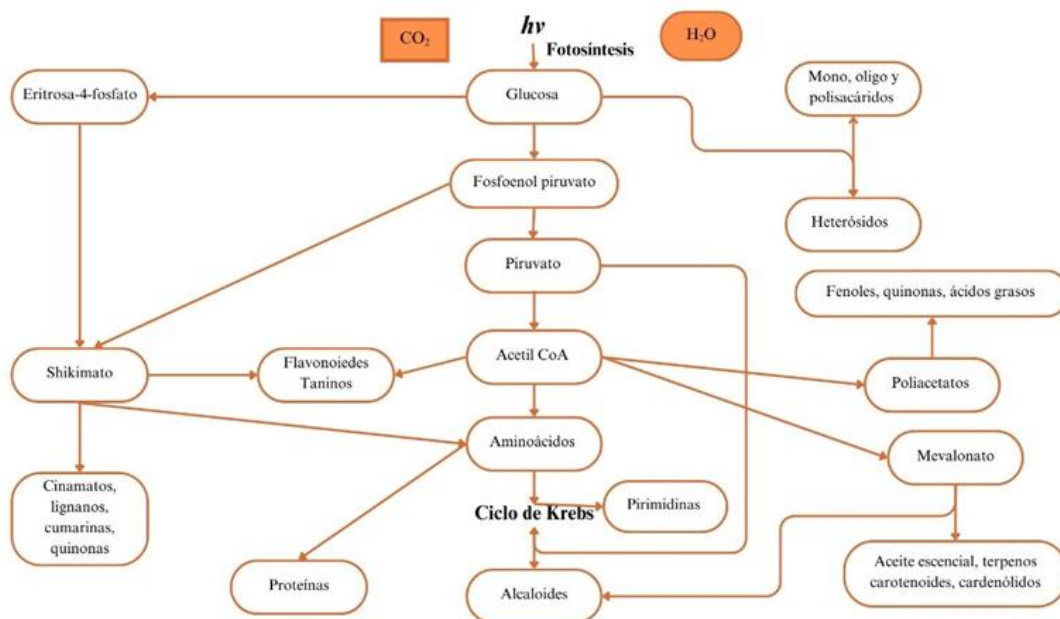


Figura 1. Rutas que generan metabolitos primarios y secundarios. Adaptado de: Qaderi et al. (2023) y Aharoni y Galili (2011).

1.1 Conversión de azúcares

A partir de las rutas metabólicas ilustradas en la (figura 1), es posible identificar cómo se generan diversos sabores y aromas a partir de la glucosa, es ampliamente conocido que la cantidad de azúcares presente en las frutas y verduras contribuyen al dulzor, estos actúan como sustratos en el metabolismo del carbono y la energía, así como la biosíntesis de polímeros (Nookaraju et al., 2010); además actúan como moléculas de señal e influyen en los procesos metabólicos regulando la expresión genética, rigen la floración, las respuestas por medio de mecanismos de defensa (Du et al., 2024; Khan et al., 2022 y Khan et al., 2020) y la estructura celular, que desencadenan reacciones metabólicas, para controlar la actividades bioquímicas y procesos fisiológicos que alteran las características organolépticas (Durán-Soria et al., 2020) por lo que se ha demostrado que a medida que envejece o madura la planta el contenido de sacarosa aumenta (Lv et al., 2022).

No obstante, los azúcares transportados se almacenan o metabolizan en varias células y tejidos, desde donde pueden afectar a la calidad de la fruta; sin embargo, hay otros factores que modifican el contenido de azúcares en los frutos como son, los procesos fisiológicos, metabólicos interconectados, y la red reguladora de genes (Lu et al., 2020).

El azúcar en las frutas se sintetiza a través de la fotosíntesis vegetal, y la regulación de estos, se da por diversos factores de transcripción, mecanismos epigenéticos, y fitohormonas (Du et al., 2024). La sacarosa y el nitrato actúan como señales que regulan la expresión genética para optimizar los flujos metabólicos según las condiciones ambientales predominantes. Este proceso ocurre principalmente en el citosol, donde se lleva a cabo la síntesis de sacarosa (Ashihara et al., 2011 y Liu et al., 2023).

De forma coordinada, entran en juego, las vías de pentosa fosfato en los plastidios y el citosol se unen como vía para desplazar metabolitos, el traslado es realizado por la xilosa-5-fosfato y en menor instancia la ribulosa-5-fosfato, hacía el ciclo de Benson-Calvin, al mismo tiempo, en el citosol, la síntesis de la sacarosa es catalizada por la enzima suc-fosfato sintasa y suc-fosfato fosfatasa, produciendo la sacarosa cuando se libera ortofosfato y suc-6-fosfato, una vez utilizado UDP-glucosa y fructosa-6-fosfato como sustrato (Griffiths et al., 2016 y Kruger y Von Schaewen, 2003). Seguidamente, la sacarosa se hidroliza por las invertasas produciendo glucosa y fructosa o por la sacarosa sintasa que produce UPD-glucosa y fructosa; finalmente, la sacarosa presenta un distintivo sabor a fruta madura (Quick et al., 2017; Harish et al., 2017 y Liu et al., 2023).

Hay tres superfamilias principales de transportadores de azúcar: la superfamilia de facilitadores principales (MFS), los transportadores de glucosa dependientes del sodio y los transportadores de azúcar eventualmente exportados (DULCES) (Xuan et al., 2013). La proteína DULCE se identificó por primera vez en la ascidia (Hamada et al., 2005). Como transportador ubicado en vacuolas tanto para hexosa como para sacarosa, la sobreexpresión de AtSWEET16 resultó en una mayor tolerancia a la congelación y una mejor germinación, así como una eficiencia en el uso de nitrógeno en Arabidopsis (Klemens et al., 2013). SWEET9 fue identificado como un transportador de azúcar específico del nectario

que funciona en la secreción de néctar para recompensar a los polinizadores (Lin et al., 2014) Los patrones de expresión sugieren que la familia SWEET está involucrada en el crecimiento y desarrollo de todos los órganos de las plantas. Existe un conjunto de genes DULCES estrechamente relacionados con el desarrollo de flores, semillas y frutos en cada especie (Liu et al., 2019).

Cabe destacar que la edad del fruto de vainilla al momento de la cosecha influye significativamente en su aroma y sabor. La sacarosa es el principal azúcar presente en el fruto verde (80 %), acompañada de pequeñas cantidades de glucosa y fructosa, las cuales aumentan ligeramente a medida que el fruto madura debido a la hidrólisis de la sacarosa (Hernández et al., 2021). El contenido de macro y micronutrientes aumenta conforme avanza la edad del fruto; los macronutrientes con mayor concentración fueron el Ca y el K, mientras que el Mn fue el micronutriente más abundante. Por otro lado, se identificaron diez metabolitos relacionados con azúcares, siendo la D-glucosa el compuesto más enriquecido, en donde se reflejan en distintas cantidades de azúcares asociadas al nivel de dulzor (Li et al., 2020).

1.2 Conversión de aminoácidos

A partir de las rutas metabólicas ilustradas en la (figura 1), es evidente que los metabolitos primarios, como los aminoácidos, desempeñan un papel central en la generación de metabolitos secundarios que contribuyen a los sabores, aromas y funciones biológicas en los vegetales. Entre los aminoácidos se destaca la metionina como un precursor esencial en diversas rutas metabólicas, su papel no se limita únicamente a la síntesis de proteínas, sino que también sirve como punto de partida para la formación de compuestos bioactivos clave. En este contexto, la conversión de aminoácidos desempeña un rol fundamental para los procesos de maduración en frutas y vegetales, siendo clave en la producción de etileno. Esta generación de etileno con sus respectivos mecanismos bioquímicos, tienen lugar en el citoplasma. Esta hormona, tiene como precursor principal la metionina (figura 2) que se considera fundamental para la síntesis de otras biomoléculas esenciales, como poliamidas,

cisteína y glutatión (Liu et al., 2022), también existe una relación de la producción de compuestos volátiles con la expresión de genes diferencial y la biosíntesis de etileno, que promueven el ablandamiento y color de las frutas (Durán-Soria et al., 2020). La metionina se transforma en S-Adenosil-metionina (SAM) por acción de la enzima SAM sintetasa (SAMS). La misma por ejecución catalítica de la enzima AAC-sintasa (ACS) es metabolizada a ácido 1-Aminociclopropano-1carboxílico (ACC). Posteriormente actuará la ACC-oxidasa (ACO) como catalizador en la conversión de ACC a etileno, ácido cianhídrico (HCN) y dióxido de carbono (CO_2) (Gavin et al., 2021).

En la formación de poliamidas la SAM es desviada para sintetizar espermina y espermidina por la acción de la enzima SAM-d Descarboxilasa en donde la metionina actúa como equilibrador en la síntesis de etileno (Franco et al., 2023). Sí bien observamos un papel antagonista, en el que la ACC puede transportarse de forma activa a las células objetivo, donde puede almacenarse o desactivarse mediante conjugación para hacer jasmonil-ACC, malonil-ACC, o γ -glutamil-ACC, por lo que la ACO produce la hormona activa que es percibida por la misma célula o se esparce a las células vecinas (Fernandez-Moreno y Stepanova, 2019). En ocasiones, por biosíntesis auto catalítica el etileno puede regular su propia producción. Sin embargo, en otro estudio donde se evalúa la putrescina exógena para extender la vida útil de las bananas en postcosecha, indican que la putrescina altera los parámetros respiratorios y los picos de producción de etileno se ven alterados, por lo que se ha observado en este estudio que en la biosíntesis de etileno y poliamidas, el carbono puede dirigirse a la formación de uno u otro, en donde se ve alterado el color y la textura en las bananas (Franco et al., 2023); lo observado muestra que, la biosíntesis toma diferentes rutas y hasta se indica que es autocatalítica por lo que se evidencian interacciones antagonista entre los compuestos iniciales y finales, que desencadenan una cascada de señalización y dan como resultado la activación y represión de factores de transcripción (Wang et al., 2023).

Conocer el proceso madurativo de los frutos climatéricos y no climatéricos por medio de la biosíntesis de etileno ayuda a controlar aromas, sabores, color y firmeza de los frutos; sin

embargo, durante el estudio de la biosíntesis se ha observado problemáticas en donde la S-Adenosil-metionina es limitada por la enzima ACC-oxidasa, por lo que se ha indagado en genes que controlan dicha biosíntesis (Gavin et al., 2021), sí bien estos sistemas no están del todo esclarecidos, se ha encontrado que hay genes que codifican la enzima ramnogalacturonano liasa durante el desarrollo y maduración del fruto y la producción de etileno en tomate, jugando un papel importante en la firmeza del fruto (Trillo-Hernández et al., 2021).

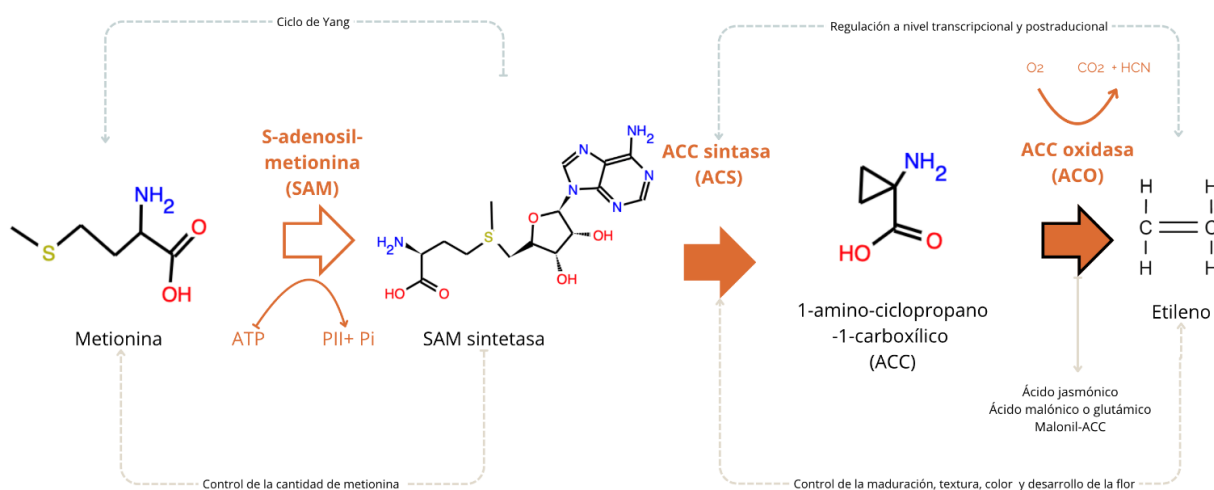


Figura 2. Representación esquemática de la ruta de biosíntesis de etileno. Adaptado de: Pattyn et al. (2021).

Al mismo tiempo, en la etapa de maduración, se resaltan otros compuestos responsables del aroma como son los aldehídos, alcoholes y ésteres que son sintetizados por aminoácidos y ácidos grasos; en donde la β -oxidación de ácidos grasos, la vía lipoxigenasa y el metabolismo de aminoácidos son las tres rutas más importantes de la biosíntesis del aroma de manzana (Yang et al., 2022). Algo similar ocurre con el aminoácido fenilalanina que genera fenoles volátiles fundamentales, responsables de las características aromáticas, utilizando la vía shikimato/arogenato tales como el fenilpropanoide y benzoides (glucósidos) mediante la enzima fenilalanina amoníaco liasa (PAL) hasta la producción de p-alcohol *p*-coumárilico y alcohol coniferílico, en donde la hidroxilación del anillo aromático y la reducción del Ester forman los fenilpropanoides que desempeñan un papel esencial en

las cualidades organolépticas en plantas y verduras (Schieber y Wüst et al., 2020).

Además, los compuestos fenólicos (polifenoles) también se derivan a través de la vía del ácido acético tales como, cumarinas, lignanos, flavonoides, isoflavonoides, antiocianinas, proantocianidinas y estilbenos (Pinto et al., 2021). Un ejemplo de polifenoles son los elagitaninos, que son atribuidos como los antioxidantes más potentes, responsables de la astringencia en fresas, frambuesas, bayas y frutos secos (Bakkalbaşı et al., 2008); otro papel de los fenoles es que influyen en la reducción del brillo en el color de la fruta (Diamanti et al., 2015).

Cabe resaltar que, la biosíntesis de compuestos aromáticos y de sabor a partir de aminoácidos como la L-fenilalanina y la L-tirosina, así como del ácido cinámico, se lleva a cabo a través de rutas secundarias altamente especializadas como las derivadas del shikimato, por lo tanto, la formación de perfiles de sabores es un proceso complejo que implica múltiples vías metabólicas y una serie de reacciones enzimáticas (Shen et al., 2020). La figura 1 permite observar cómo estas rutas metabólicas interconectan los metabolitos primarios y secundarios, evidenciando la importancia de los aminoácidos como sustratos básicos en este proceso.

También cabe destacar que, dentro de la conversión de aminoácidos, resalta la L-fenilalanina, que es transformada en ácido cinámico a través de la acción de la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL). Esta es una reacción clave en la vía de los fenilpropanoides, que produce una amplia gama de compuestos aromáticos, entre estos se encuentra la conversión de ácido cinámico a ácido p-cumárico, un intermediario crucial en la biosíntesis de flavonoides y otros fenilpropanoides; de hecho, en los alimentos de origen vegetal influye notablemente en sus propiedades organolépticas, contribuyendo a la acidez o amargor; los derivados del ácido cinámico presentan aroma dulce y especiado y actúan como copigmentos (Schieber y Wüst, 2020; Pinto et al., 2021; Shen et al., 2020 y Petersen et al., 2020).

Finalmente, la L-tirosina, similar a la L-fenilalanina, es transformada en ácido p-hidroxicinámico mediante una serie de reacciones enzimáticas (Tan et al., 2020). La tirosina

amonio-liasa (TAL) convierte la tirosina en p-hidroxicinamato, que puede ser posteriormente convertido en otros compuestos aromáticos; los compuestos formados a partir de L-fenilalanina, L-tirosina y ácido cinámico son esenciales para el perfil sensorial de frutas y vegetales (Rhodes y Woollorton, 1978). Esta reacción contribuye a la conexión intrínseca entre la bioquímica vegetal y las propiedades organolépticas, afectando el aroma y el sabor, y creando una experiencia sensorial rica y compleja. A grandes rasgos, los compuestos generados por esta vía contribuyen a aromas florales, herbales, especiados y dulces (Ong et al., 2018 y Mostafa., 2022).

1.3 Utilización de ácidos grasos

En el recorrido por las rutas metabólicas claves, abordamos la importancia de los ácidos grasos, otro aspecto importante el cual cumple con diversas funciones esenciales en el metabolismo. Los ácidos grasos cumplen con diversas funciones en el metabolismo como ser el componente sustancial de todas las membranas, ajustan la expresión de genes, sirven como protección mecánica, como combustible metabólico, pero también actúan como biomarcadores, cumplen un papel en la regulación de la fluidez y de sus derivados (De Carvalho y Caramujo, 2018).

La vía metabólica de los ácidos grasos es fundamental en la biosíntesis de compuestos volátiles que contribuyen al aroma y sabor de frutas y vegetales. Esta vía incluye varias etapas y procesos enzimáticos que transforman los ácidos grasos en una variedad de compuestos aromáticos y de sabor; como son los aldehídos, alcoholes, cetonas y ésteres insaturados de cadena corta; entre las enzimas de mayor importancia que afectan esta vía metabólica, encontramos a las lipoxigenasas (LOX), hidroxiperóxido-liasa (HPL) y alcohol deshidrogenasa (ADH) (Dávila-Aviña et al., 2011).

Cabe señalar que los ácidos grasos son sintetizados endógenamente por la acción conjunta de la acetil-CoA carboxilasa (ACC) y los ácidos grasos sintasas (FAS), la enzima ACC cataliza la conversión de acetil-CoA en malonil-CoA; por lo que esta ruta conocida como biosíntesis de Novo proporciona ácido palmítico, 16:0, que pueden ser sustrato de elongasas para

transformarse en ácido esteárico 18:0 (Ohlrogge et al., 2018 y Carraro et al., 2019). Se puede señalar que, la actividad de la ACC se basa en el transporte de proteínas de biotina carboxil, biotina carboxilasa y la subunidad α y β de la carboxiltransferasa (He et al., 2020).

Dado que las lipoxigenasas (LOX) son enzimas cruciales en la oxidación de ácidos grasos poliinsaturados como el ácido linoleico y el linolénico, esta ruta produce compuestos como hexanal, hexenales, hexanol y acetatos, responsables del aroma verde y afrutado (Christie y Harwood, 2020; Yadav et al., 2018 y Genovese et al., 2021). Se han identificado compuestos volátiles derivados de la ruta de la lipoxigenasa entre estos: (Z)-3-hexenal, (Z)-3-hexenol, hexanal, 1-penten-3-ona, 3-metilbutanal, (E)-2-hexenal, 6-metil-5-hepten-2-ona, salicilato de metilo, 2-isobutiltiazol y β -ionona, estos a diferentes concentraciones producen el aroma de un tomate fresco y maduro, y disminuyen a medida que el fruto madura (Ties y Barringer, 2012). Paralelamente, la vía de la 5-lipoxigenasa metaboliza el ácido araquidónico, conduciendo a la síntesis de leucotrienos (Cheng et al., 2025).

A la vez, la ruta de la lipoxigenasa da lugar a la inserción de oxígeno molecular en los ácidos grasos, formando hidroperóxidos de ácidos grasos, tales como los 13-hidroperóxidos (13-HPOD) y los 9-hidroperóxidos (9-HPOD) a partir del ácido linoleico y linolénico que son hidrolizados por la hidroperóxidos liasa (HPL) en compuestos volátiles como aldehídos de seis átomos de carbono, alcoholes y oxoácidos, a estos se le atribuye un aroma verde y fresco (Vincenti et al., 2019 y Tang et al., 2024).

Entre las moléculas generadas con olor y sabor a partir de la vía metabólica de los ácidos grasos, se encuentran varios compuestos, aldehídos como el hexanal, contribuyen a los aromas frescos y verdes en frutas y vegetales, y son responsables, por ejemplo, del característico olor a tomate (Dávila-Aviña et al., 2011). El trans-2-hexenal proporciona un aroma fresco y cortante, característico de manzanas, y es el componente principal en las hojas del té verde (Klee et al., 2018 y Uchida et al., 2022), el nonadienal aporta un aroma floral y dulce, común en pepinos (Zhao et al., 2021). Los alcoholes generados por la alcohol deshidrogenasa, incluyen el hexanol, con un aroma herbal y notas florales (Tomé-Rodríguez et al., 2022), el cis-3-hexen-1-ol, cis-3-hexenal, trans-2-hexen-1-ol, y 2,6-

dimethylcyclohexanol que presentan un aroma fresco, a hierba cortada, vegetales y frutas (Zhang et al., 2026) por otro lado, las cetonas como la 6-metil-5-hepten-2-ona contribuyen a los aromas afrutados, fresco y dulces, siendo el principal componente de los frutos maduros de tomate proveniente de la escisión oxidativa del licopeno (Diestefano et al., 2022) y los ésteres, que no son directamente productos de la vía de los ácidos grasos, pero se pueden formar debido a reacciones entre los alcoholes y ácidos generados en esta vía, los mismos son cruciales en el aroma frutal, como el éster hexílico, que presenta tonos frutales hasta cítricos o ligeramente florales (Mostafa et al., 2022 y Xu et al., 2024).

Una variante atractiva de los ácidos grasos son los omega-3 ($\omega 3$), que son ácidos grasos polinsaturados que se presentan en los alimentos como: α -linolénico (18:3 $\omega 3$, α -ALA), ácido eicosapentaenoico (20:5 $\omega 3$, EPA) y ácido docosahexaenoico (22:6 ω , DHA). El α -ALA puede encontrarse en algunos aceites vegetales (de linaza, soja y canola), chía, nueces, maníes y aceitunas; el EPA, DPA y DHA en los aceites de pescado principalmente de aguas frías como salmón, atún, sardinas, algas y microalgas (Feliu et al., 2021).

1.4 Síntesis de terpenos y carotenoides

Como última vía metabólica en las plantas, los terpenoides, son una amplia clase de metabolitos secundarios sintetizados en las plantas en cantidades pequeñas, desempeñan un papel esencial tanto en la pigmentación como en el aroma característico de diversas especies vegetales (Zhang et al., 2023). Los carotenoides, por ejemplo, son responsables del color naranja, rojo y amarillo, estos pigmentos de color pertenecen a los metabolitos secundarios lipófilos resultantes de la vía isoprenoide (Riaz et al., 2021).

Estos compuestos son sintetizados a partir de precursores como el isopentenil pirofosfato (IPP) y el dimetilalil pirofosfato (DMAPP), los cuales se generan en la vía del mevalonato (MVA) que tiene lugar en el citosol o la vía del metileritritol fosfato (MEP), que tiene lugar en los plastidios (figura 3), en las células vegetales estas rutas se dan en diferentes lados (Yao et al., 2022).

Se ha demostrado que los genes influyen significativamente en la regulación transcripcional

de la biosíntesis de carotenoides en el tomate, en la cual el nivel de expresión SIWRK35 aumentó durante la maduración de la fruta, sin embargo, la vía de etileno regula la señalización de esta proteína, lo que indica que los factores de transcripción controlan el crecimiento, la floración, la maduración, entre otros (Yuan et al., 2022).

Este mismo efecto de activación de etileno en la biosíntesis de carotenoides se ve señalizada durante el desarrollo y coloración de la fruta, a medida que estos evolucionan, la expresión de los niveles de transcripción y la proteína CsERO61 aumentan (Sathasivam et al., 2021). Numerosas investigaciones han evidenciado que el etileno es una hormona vegetal crucial para el control de la maduración de los frutos, afectando aspectos como el color, la textura, el aroma, el sabor y diversos compuestos nutricionales (Pech et al., 2018).

Estos procesos bioquímicos no solo afectan la apariencia visual de las plantas, sino también su perfil sensorial. Desde los colores vibrantes hasta los aromas distintivos, cada grupo de terpenoides juega un papel crucial en la adaptación de las plantas al entorno y en su interacción con otros organismos (Simkin, 2021).

Aunque algunos compuestos aromáticos, como los apocarotenoides, también poseen propiedades beneficiosas para la salud, destacan el β -ciclocitral, la β -ionona, el geranial, la acetona de geranilo, la theaspirona, la α -damascenona, la β -damascenona y la 6-metil-5-hepten-2-ona (MHO). Estos compuestos contribuyen significativamente a los perfiles aromáticos de diversas flores y frutos en plantas hortícolas y son altamente valorados en la industria del sabor y la fragancia (Shi et al., 2020).

En términos de diversidad, los terpenoides se clasifican en varios grupos según el número de unidades de isopreno que los componen, entre ellos podemos encontrar a los monoterpenos (figura 3), que consisten en dos unidades de isopreno (Mabou y Yossa, 2021), estos son los compuestos más volátiles, que suelen encontrarse en plantas y alimentos procesados (Paulino et al., 2022); aportando aromas afrutados, florales, mentados, cítricos, frescos, herbáceos, camporáceos, leñosos, pinos y picantes (Zhang et al., 2023; Mahanta et al., 201 y Cui et al., 2024).

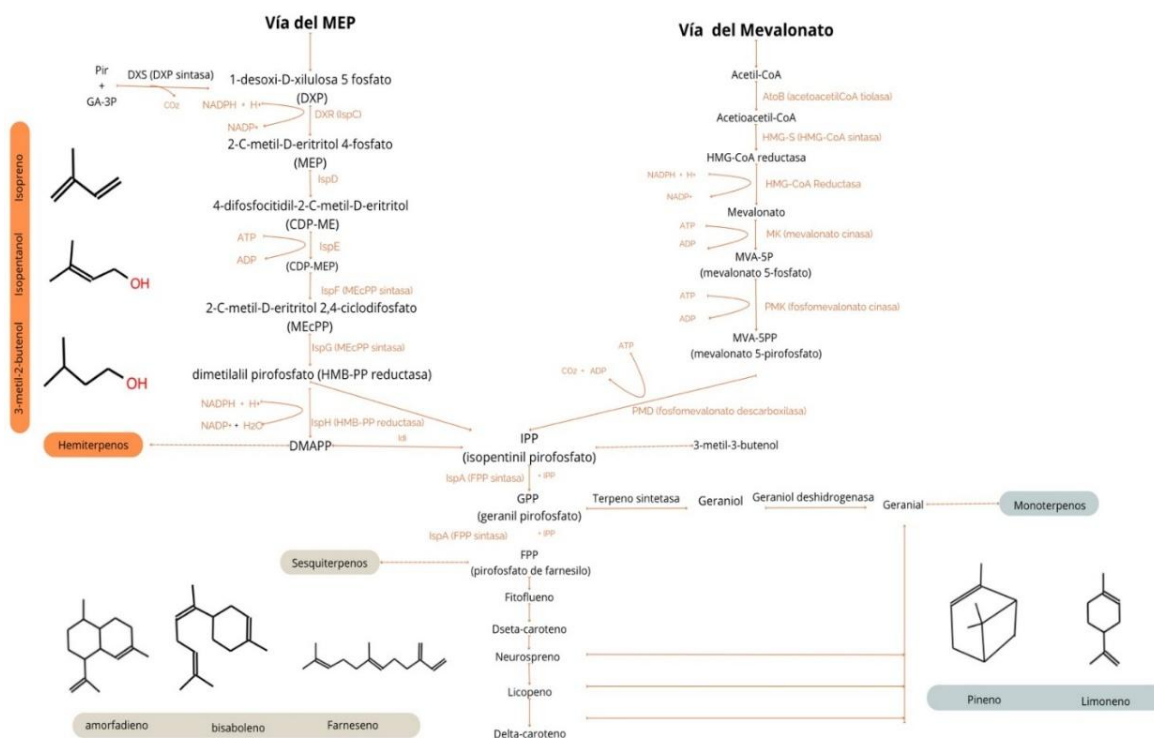


Figura 3. Síntesis de geranil pirofosfato mediante las rutas del MEP y mevalonato. Adaptado de: Pathak et al. (2023).

Por otro lado, la figura 3. Nos muestra a los sesquiterpenos, constituyentes de tres unidades de isopreno, siendo sintetizados por la sesquiterpeno sintasa, lo que resulta en moléculas con mayor peso molecular, menos volátiles con aromas más persistentes que se perciben como “notas de salida” u olor similar a los cítricos (Harms et al., 2020), característicos de especias como la canela (Stevens y Allred, 2022) y el jengibre (Al-Tannak et al., 2022).

Así mismo, los di y triterpenos, por su parte, confieren diferentes sensaciones gustativas y la estimulación del receptor dulce hTAS1R2/R3, que a menudo confieren sabores amargos, dulces y regaliz (Schmid et al., 2021); mientras que los fenilpropanoides, conducen a la generación de fenoles volátiles activos derivados de ácidos grasos y aminoácidos por medio de la vía del shikimato, estos compuestos generan olor en alimentos derivados de plantas (Mostafa et al., 2022) que incluyen compuestos como el eugenol del clavo de olor y el anetol del anís estrellado, estos agregan aromas distintivos gracias a su estructura química que

combina un anillo aromático con una cadena lateral; también, se puede encontrar eugenol en la salsa de chile jalapeño (*Capsicum annum*) y papaya (*Carica papaya*) (Fuentes et al., 2020). Además, se encuentran otros compuestos terpénicos menos volátiles y más complejos, así como derivados alifáticos y sustancias con contenido de azufre y nitrógeno, que contribuyen a los perfiles aromáticos y de sabor en plantas como el ajo y el brócoli (Pinto et al., 2021 y Marcinkowska y Jeleń, 2022).

2. Generación de aromas por tratamiento térmico

La generación de aromas y sabores no solo depende de las rutas metabólicas biosintéticas, sino que también puede ser influenciada por procesos térmicos. Uno de los mecanismos más relevantes en este contexto es la reacción de Maillard (MR), un proceso no enzimático que ocurre entre los azúcares reductores y los grupos aminos libres presentes en los alimentos. Esta reacción es clave en la formación de compuestos aromáticos y la modificación de las propiedades organolépticas, contribuyendo significativamente al desarrollo de nuevos perfiles sensoriales (Kathuria et al., 2023), en donde los sabores distintivos de los alimentos procesados térmicamente se generan comúnmente a través de la degradación de Strecker como etapa final de la MR (figura 4), que es responsable de generar diversos compuestos heterocíclicos, incluyendo pirazinas, pirroles, piridinas, entre otros (Salehi, 2021). Estos compuestos son sensorialmente activos e influyen directamente sobre la calidad de los alimentos, como el sabor, el color y la textura (Yu et al., 2021) dichos compuestos se dividen en tres grandes moléculas, las que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno, siendo estas últimas las moléculas claves que generan aromas en la RM (tabla 1) (Starowicz y Zieliński, 2019).

La reacción de Maillard se puede subdividir en tres etapas principales (figura 4). En primer lugar, la etapa inicial conduce a la formación reversible de glicosilaminas, las cuales se reordenan a través de los reordenamientos de Amadori o Heyns (Igartúa y Sceni, 2023). Esta etapa, además de influir considerablemente en el sabor y el color de los alimentos procesados, tiene la capacidad de producir sabores frescos y deseables (Han et al., 2024) se

ha demostrado que, los reordenamientos de aminoácidos de Amadori pueden servir como aditivos de sabor prometedores, ofreciendo una buena oportunidad para reemplazar los componentes de sabor inestables tradicionales, especialmente los productos de la reacción de Maillard (Luo et al., 2021).

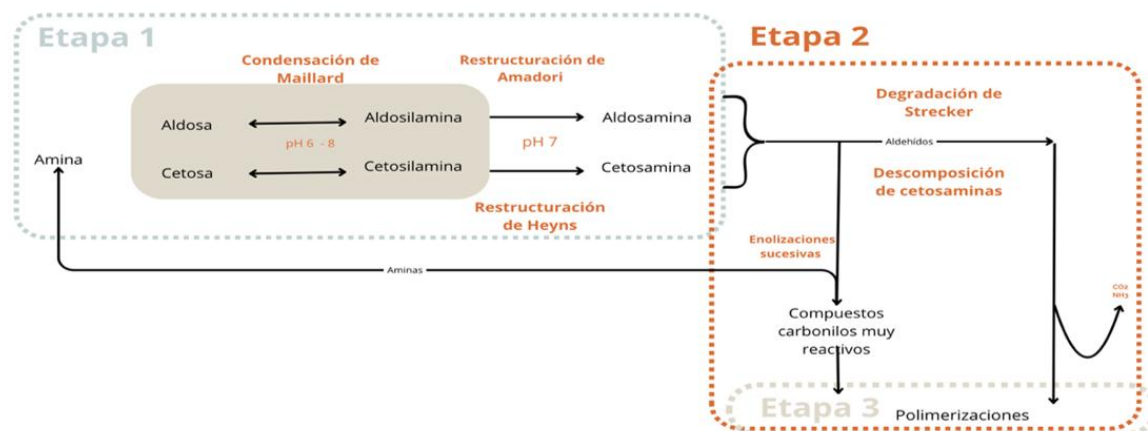


Figura 4. Reacción de Maillard. Adaptado de: Yu et al. (2021) y Provost (2019).

Cabe resaltar que la impartición del color marrón se atribuye principalmente a las melanoidinas; sin embargo, debido a su naturaleza compleja y heterogénea, sus estructuras químicas aún no están completamente definida (Wang et al., 2011 y Zhang et al., 2024). Se ha demostrado que las modificaciones en el color pueden estar relacionadas con factores descritos por Muralla y Coelho, quienes sugieren que ciertos compuestos derivados de la reacción de Maillard influyen en estas variaciones cromáticas. Además, el sabor a caramelo o tostado se debe a la formación de matol, mientras que el sabor a fresa está asociado a la presencia de funareol (Coelho Neto et al., 2022). Estos cambios en el color y el perfil de sabor podrían estar relacionados con el reordenamiento de Amadori, ya que este proceso químico influye en la formación de compuestos intermedios que participan en la evolución de los pigmentos y sabores característicos de los alimentos procesados.

En segundo lugar, la segunda etapa corresponde a la degradación de los productos de los reordenamientos de Amadori y Heyns, se conoce como, degradación de Strecker, que conduce, en particular, a la formación de compuestos heterocíclicos responsables de los

lores. Se ha encontrado que los sabores de los productos secos y tostados a alta temperatura son fuertemente afectados por la formación de estos compuestos heterocíclicos que generan sabores térmicos. Estas estructuras cíclicas contienen un átomo diferente al carbono, como el nitrógeno (por ejemplo, en pirazinas y piridinas) (Parr et al., 2023).

Sí observamos en detalle, las pirazinas no solo se forman en los alimentos a través del tratamiento térmico, sino que también se generan mediante la fermentación (Fayek et al., 2023). Estas pirazinas heterocíclicas volátiles contienen nitrógeno y contribuyen a los sabores de horneado, tostado y a nuez en los productos alimenticios (Starowicz y Zieliński, 2019).

El tercer paso corresponde a la polimerización de los intermedios de reacción producidos durante el segundo paso, formándose compuestos heterocíclicos nitrogenados (Gartúa y Sceni, 2023). Además, aunque se ha detectado que estos productos generados por la reacción de Maillard en una etapa avanzada pueden tener un impacto negativo y aumentar la citotoxicidad, no obstante, estos compuestos heterocíclicos y las melanoidinas tienen una función beneficiosa, como ejercer capacidades antioxidantes, antibacterianas y otras acciones biológicas (Ke y Li, 2023).

Tabla 1. Compuestos generados a partir de la reacción de Maillard.

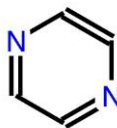
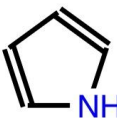
	Compuesto	Características	Alimento	Estructura	Referencia
Moléculas que contienen nitrógeno	Pirazinas	Sabores a: Horneado, Tostado, Nuez	Carne de res, cebada tostada, cacao, café, maní, papas fritas y verduras.		Yu et al. (2021); Mortzfeld et al. (2020).
	Pirroles	Grano tostado Aroma a pan	Tés, arroz cocido y pan		Yang et al. (2023); Adams y De Kimpe (2006).

Tabla 1. Compuestos generados a partir de la reacción de Maillard.

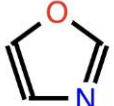
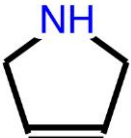
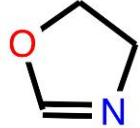
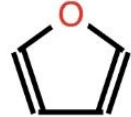
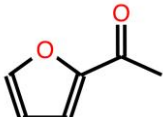
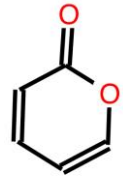
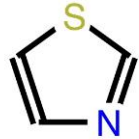
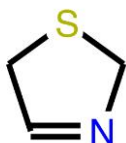
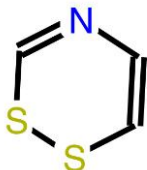
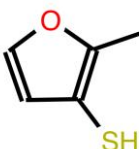
	Oxazoles	Sabor a nuez, dulce, y notas verdes	No reportado		Maga y Katz. (1981)
	Pirrolinas	Aroma a pan	Pan, arroz, palomitas de maíz y trigo		Verma y Srivastav. (2020); Žuljević y Spaho (2024)
	Oxazolinas	Precursor de aroma en el chocolate oscuro	Chocolate oscuro con 70% de cacao		Granvogl et al. (2012)
Compuestos que contienen oxígeno	Furanos	Notas de olor a nuez y tostado. Sabor dulce, frutal, tostado, picante.	Pan, galletas, mermeladas, miel, cereales, café.		Liu et al. (2020)
	Furfurales	Dulce, amaderado	Pan sin gluten, pasta, dulce de leche		Starowi y Zieliński. (2019)
	Piranonas	No reportado	Té verde		Starowi y Zieliński. (2019)
Compuestos que contienen azufre	Tiazoles	Sabor a carne asada y nuez	Estofado de carne, papa, papas fritas, nueces tostadas (alimentos fritos, asados o a la parrilla)		Liu et al. (2020); Parr et al. (2023)

Tabla 1. Compuestos generados a partir de la reacción de Maillard.

Tiazolinas	Olores que van desde los salados (carnosos, grasos y de cebolla) hasta los dulces (palomitas de maíz, nueces y arroz tostado)	Cebada tostada, pollo hervido, carne hervida.		Parr et al. (2023); Yeo et al. (2022)
Ditiazinas	Sabor alimento calentado	a No reportado		Werkhoff et al. (1992)
Furantioles	Notas de nuez	Carne asada, nuez, patata		Sun et al. (2023)

El estudio de los compuestos generados en la reacción de Maillard es fundamental para comprender la complejidad de los sabores y aromas en los alimentos procesados. La tabla 1 refuerza la importancia de los compuestos generados en la reacción de Maillard, destacando su papel en la formación de sabores y aromas característicos en diversos alimentos. La presencia de compuestos heterocíclicos nitrogenados como pirazinas, pirroles y oxazoles confirma que la degradación de Strecker en la segunda etapa contribuye a la complejidad sensorial de productos como el café, la carne y el pan. Asimismo, la formación de furanos y furfurales en la tercera etapa sugiere su implicación en la polimerización y en la generación de melanoidinas, las cuales pueden influir tanto en el color como en la bioactividad de los alimentos.

Por otro lado, los compuestos que contienen azufre, como tiazoles, tiazolinas y ditiacinas,

desempeñan un papel crucial en los sabores asociados a alimentos cocidos y tostados. Estos compuestos aportan notas cárnicas, a nuez y a cebolla, lo que resalta la importancia de la reacción de Maillard en la generación de sabores complejos en productos como carne asada, cebada tostada y estofados. Sin embargo, la formación de ciertos compuestos azufrados puede estar vinculada a olores no deseados o incluso a la generación de sustancias con potencial impacto en la salud.

Este doble papel de los compuestos de Maillard abre el debate sobre la necesidad de optimizar las condiciones de procesamiento térmico para maximizar la formación de compuestos deseables y minimizar aquellos con efectos adversos. Si bien estos compuestos aportan características sensoriales atractivas y pueden tener propiedades antioxidantes y antibacterianas, su potencial citotoxicidad y la posibilidad de generar sustancias indeseables hacen necesario un control preciso en la producción de alimentos.

Tras la degradación por la reacción de Maillard, la temperatura también influye en la transformación de los lípidos presentes en los alimentos. La degradación térmica de estos compuestos genera una amplia variedad de sustancias volátiles y no volátiles, que afectan el aroma, el sabor y el color de los productos procesados (Ramos et al., 2023 y Marchesino et al., 2020). La degradación de lípidos a diferentes temperaturas produce compuestos que contribuyen al sabor y color de los alimentos (Wang et al., 2022). Esta degradación se produce fundamentalmente mediante autooxidación, fotooxidación y oxidación enzimática, que originan una gran variedad de compuestos volátiles (Shahidi y Hossain, 2022).

Dentro de este marco se ha demostrado que el linoleato de metilo afecta significativamente el perfil de sabor carnosos y que la oxidación de lípidos es evidente a altas temperaturas (Wang et al., 2022). Asimismo, indica que, durante las reacciones oxidativas, se forman principalmente aldehídos, cetonas, alcoholes y ácidos carboxílicos, algunos de los cuales son compuestos electroactivos (Ramírez-Montes et al., 2023). Mientras que, los resultados de muestran que las altas temperatura disminuyen el contenido de tocoferoles, polifenoles, benzopireno, que generan un sabor fuerte fragante y que el compuesto más influyente es

el 2,5-dimetilo proporcionando sabor a barbacoa (Dinh et al., 2021).

Además, los aldehídos saturados en la reacción de Maillard (RM) incrementan la acidez y disminuyen el sabor umami, mientras que los insaturados cambian los compuestos no volátiles como tioéteres arílicos y ácidos grasos. Por otro lado, los aldehídos saturados reducen el dorado, modificando sabores mediante productos de oxidación lipídica (Dinh y Schilling, 2021). Se ha demostrado que la oxidación de ácidos grasos insaturados genera hidroperóxidos que luego se descomponen en productos de oxidación de lípidos secundarios volátiles y olorosos, incluidos aldehídos, alcoholes y cetonas (Shahidi y Hossain, 2022).

Las interacciones entre los productos resultantes de la oxidación de lípidos y los compuestos formados por la reacción de Maillard desempeñan un papel más crucial en la formación del sabor de la carne de lo que se había considerado previamente, además, los compuestos volátiles originados de las grasas aportan matices de sabor que permiten la identificación de las especies (Dinh y Schilling, 2021). En los productos cárnicos, los lípidos son descompuestos por la lipasa para generar precursores de sabor como los ácidos grasos libres, estos precursores se oxidan adicionalmente, produciendo compuestos de sabor volátiles (Fu et al., 2022). Por lo que, la variación en los aromas de la carne cocida (res, cerdo, aves y ovejas) se debe a la existencia de una interacción entre los lípidos y la reacción de Maillard. Entre las moléculas que contribuyen a los aromas de la carne cocida se encuentran los aldehídos alifáticos de cadena corta (C6-C10), el 1-octen-3-ol (o 1-octen-3-ona) y los compuestos heterocíclicos que contienen azufre o nitrógeno (Sohail et al., 2022). En definitiva, la reacción de Maillard y la degradación de los lípidos son procesos clave en la generación de sabores y aromas en los alimentos procesados, con una compleja interacción entre compuestos nitrogenados, oxigenados y azufrados. Aunque estos procesos potencian el perfil sensorial y pueden conferir propiedades beneficiosas, también plantean desafíos en términos de control de calidad y seguridad alimentaria. La optimización de las condiciones térmicas y la comprensión de los factores que influyen en estas reacciones resultan esenciales para maximizar los beneficios sin comprometer la

estabilidad ni la inocuidad de los productos. Así, el estudio de estas interacciones sigue siendo un campo de gran interés para la industria alimentaria y la investigación científica.

Conclusión

Los metabolitos bioactivos en alimentos, como terpenos, pigmentos, compuestos fenólicos y derivados de azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, desempeñan un papel fundamental en la calidad sensorial y nutricional de los alimentos. La literatura revisada indica que la generación de aromas y sabores está influenciada por diversas rutas metabólicas, como la lipoxigenasa en la oxidación de lípidos, la descarboxilación y transaminación de aminoácidos, y la degradación térmica de azúcares, procesos que contribuyen al desarrollo de perfiles sensoriales únicos en los alimentos procesados.

Sin embargo, persisten desafíos en la producción y estabilidad de estos compuestos. La variabilidad en su biosíntesis, influenciada por factores genéticos y ambientales, dificulta su control y aplicación industrial. Además, la identificación y caracterización de estos metabolitos sigue siendo un reto debido a la complejidad de las reacciones químicas involucradas.

Es necesario seguir investigando la optimización de estas rutas metabólicas para mejorar la producción de compuestos aromáticos y bioactivos con impacto positivo en la calidad y seguridad de los alimentos. La integración de enfoques biotecnológicos y analíticos permitirá un mejor aprovechamiento de estos metabolitos, favoreciendo el desarrollo de alimentos con propiedades sensoriales mejoradas y beneficios potenciales para la salud.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el valioso apoyo brindado a través del proyecto PNPAC-2023-9, el cual ha sido fundamental para el desarrollo de la Maestría en Ciencias Químicas con Énfasis en Inocuidad Alimentaria y para la realización de este trabajo. Agradezco igualmente a los profesores y colaboradores que, con su orientación y valiosas



aportaciones, enriquecieron este artículo. De manera especial, a la doctora Ariadna Batista, a la profesora Vielka de Guevara y a la profesora Jacqueline Jones, quienes, gracias a su experiencia y conocimientos, ofrecieron una guía invaluable durante la elaboración del manuscrito. Asimismo, extendo mi reconocimiento al doctor José Robinson Duggon por la revisión crítica del artículo titulado “Aromas y sabores naturales en alimentos: una revisión de sus principales rutas metabólicas”, cuyas observaciones y comentarios han contribuido de manera significativa a perfeccionar su contenido.

Referencias

- Adams, A., y De Kimpe, N. (2006). Chemistry of 2-acetyl-1-pyrroline, 6-acetyl-1, 2, 3, 4-tetrahydropyridine, 2-acetyl-2-thiazoline, and 5-acetyl-2, 3-dihydro-4 H-thiazine: Extraordinary Maillard flavor compounds. *Chemical reviews*, 106(6), 2299-2319.
<https://doi.org/10.1021/cr040097y>
- Aharoni, A., y Galili, G. (2011). Metabolic engineering of the plant primary–secondary metabolism interface. *Current opinion in biotechnology*, 22(2), 239-244.
- Al-Tannak, N. F., Anyam, J. V., Igoli, N. P., Gray, A. I., Alzharani, M. A., y Igoli, J. O. (2022). A new sesquiterpene from South African wild ginger (*Siphonochilus aethiopicus* (Schweinf) B.L. Burt). *Natural Product Research*, 36(19), 4943-4948.
<https://doi.org/10.1080/14786419.2021.1914029>
- Arias-Giraldo, S., y López-Velasco, D. M. (2019). Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*, 22, 123-135.
<https://doi.org/10.21501/21454086.3252>
- Ashihara, H., Crozier, A., y Komamine, A. (Eds.). (2011). *Plant metabolism and biotechnology*. Chichester: Wiley. 1-25. doi:10.1002/9781119991311
- Bakkalbaşı, E., Menteş, Ö., y Artik, N. (2008). Food ellagitannins—occurrence, effects of processing and storage. *Critical reviews in food science and nutrition*, 49(3), 283-298. doi: 10.1080/10408390802064404
- Carraro, P. C., Da Silva, E. D., y Oliveira, D. E. (2019). Palmitic acid increases the abundance of mRNA of genes involved in de novo synthesis of fat in mammary explants from lactating ewes. *Small Ruminant Research*, 174, 99-102.
<https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.02.020>
- Chempakam, B., y Ravindran, P. N. (2023). Spices as Cosmeceuticals. In *Handbook of Spices in India: 75 Years of Research and Development* (pp. 4107-4189). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3728-6_65
- Cheng, J., Yang, K., Li, X., Liu, B., Chen, M., y Li, C. (2025). Identification of the arachidonic acid 5-lipoxygenase and its function in the immunity of *Apostichopus japonicus*. *Fish & Shellfish Immunology*, 157, 110095.
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.110095>
- Christie, W. W., y Harwood, J. L. (2020). Oxidation of polyunsaturated fatty acids to produce lipid mediators. *Essays in biochemistry*, 64(3), 401-421.
<https://doi.org/10.1042/EBC20190082>
- Chumroenphat, T., Somboonwatthanakul, I., Saensouk, S., y Siriamornpun, S. (2019). The diversity of biologically active compounds in the rhizomes of recently discovered Zingiberaceae plants native to North Eastern Thailand. *Pharmacognosy Journal*, 11(5). <https://doi.org/10.5530/pj.2019.11.160>
- Coelho Neto, D. M., Moreira, L. L., de Castro, E. V., Souza, W. B., Filgueiras, P. R., Romão, W., ... y Lacerda Jr, V. (2022). Estudo do perfil químico de cervejas brasileiras: uma avaliação entre as bebidas artesanais e industriais. *Química Nova*, 45, 518-530.
<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170857>

- Cui, Q., Jiang, L. J., Wen, L. L., Tian, X. L., Yuan, Q., y Liu, J. Z. (2024). Metabolomic profiles and differential metabolites of volatile components in Citrus aurantium Changshan-huyou pericarp during different growth and development stages. *Food Chemistry: X*, 23, 101631. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101631>
- Dávila-Aviña, J. E. D. J., González-Aguilar, G. A., Ayala-Zavala, J. F., Sepúlveda, D. R., y Olivas, G. I. (2011). Compuestos volátiles responsables del sabor del tomate. *Revista fitotecnica mexicana*, 34(2), 133-143.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000200012&lng=es&tlng=es
- De Carvalho, C. C., y Caramujo, M. J. (2018). The various roles of fatty acids. *Molecules*, 23(10), 2583. <https://doi.org/10.3390/molecules23102583>
- Deryabin, D., Galadzhieva, A., Kosyan, D., y Duskaev, G. (2019). Plant-derived inhibitors of AHL-mediated quorum sensing in bacteria: Modes of action. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), 5588. <https://doi.org/10.3390/ijms20225588>
- Diamanti, J., Balducci, F., Di Vittori, L., Capocasa, F., Berdini, C., Bacchi, A., ... y Mezzetti, B. (2015). Physico-chemical characteristics of thermally processed purée from different strawberry genotypes. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.05.006>
- Diez-Simon, C., Mumm, R., y Hall, R. D. (2019). Mass spectrometry-based metabolomics of volatiles as a new tool for understanding aroma and flavour chemistry in processed food products. *Metabolomics*, 15(3), 41. <https://doi.org/10.1007/s11306-019-1493-6>
- Dinh, T. T., To, K. V., y Schilling, M. W. (2021). Fatty acid composition of meat animals as flavor precursors. *Meat and Muscle Biology*, 5(1). doi:
<https://doi.org/10.22175/mmb.12251>
- Distefano, M., Mauro, R. P., Page, D., Giuffrida, F., Bertin, N., y Leonardi, C. (2022). Aroma Volatiles in Tomato Fruits: The Role of Genetic, Preharvest and Postharvest Factors. *Agronomy*, 12(2), 376. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020376>
- Du, M., Zhu, Y., Nan, H., Zhou, Y., y Pan, X. (2024). Regulation of sugar metabolism in fruits. *Scientia Horticulturae*, 326, 112712.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112712>
- Durán-Soria, S., Pott, D. M., Osorio, S., y Vallarino, J. G. (2020). Sugar signaling during fruit ripening. *Frontiers in Plant Science*, 11, 564917.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.564917>
- Fayek, N. M., Xiao, J., y Farag, M. A. (2023). A multifunctional study of naturally occurring pyrazines in biological systems; formation mechanisms, metabolism, food applications and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(21), 5322-5338. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2017260>
- Feliu, M. S., Fernández I., y Slobodianik, N. (2021). Importancia de los ácidos grasos omega 3 en la salud Importance of omega 3 fatty acids in health. *Actualización en nutrición*, 22(1), 25-32.
- Fernandez-Moreno, J. P., y Stepanova, A. N. (2019). Monitoring ethylene in plants:

- genetically encoded reporters and biosensors. *Small Methods*, 4(8), 1900260. Doi: <https://doi.org/10.1002/smt.201900260>
- Franco, M. F. S., Preczenhak, A. P., Bonandi, R., Oliveira, E. R., Rocha, T., y Kluge, R. (2023). La aplicación de putrescina exógena extiende la vida útil de las bananas en postcosecha. *Investigación Joven*, 10(2), 258-262. <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/article/view/15941/15617>
- Fu, Y., Cao, S., Yang, L., y Li, Z. (2022). Flavor formation based on lipid in meat and meat products: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 46(12), e14439. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14439>
- Fuentes, J. M., Loza, M. T., Murillo, I. V., Carrión, L. C., Ortega, H. S., y Antúnez, H. D. (2020). Efecto del eugenol en la vida útil de una salsa de chile jalapeño (*Capsicum annum*) y papaya (*Carica papaya*). *Nexo Revista Científica*, 33(01), 69-76 <https://doi.org/10.5377/nexo.v33i01.10046>
- Gavin, C., Barzallo, D., Vera, H., y Lazo, R. (2021). Revisión bibliográfica: Etileno en poscosecha, tecnologías para su manejo y control. *Ecuadorian Science Journal*, 5(4), 163-178. <https://doi.org/10.46480/esj.5.4.179>
- Genovese, A., Caporaso, N., y Sacchi, R. (2021). Flavor Chemistry of Virgin Olive Oil: An Overview. *Applied Sciences*, 11(4), 1639. <https://doi.org/10.3390/app11041639>
- Granvogl, M., Beksan, E., y Schieberle, P. (2012). New insights into the formation of aroma-active Strecker aldehydes from 3-oxazolines as transient intermediates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(25), 6312-6322. <https://doi.org/10.1021/jf301489j>
- Griffiths, C. A., Paul, M. J., y Foyer, C. H. (2016). Metabolite transport and associated sugar signalling systems underpinning source/sink interactions. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1857(10), 1715-1725. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2016.07.007>
- Gulsen, S. H., Touray, M., Cimen, H., y Hazir, S. (2024). Antiprotozoal Activity of Secondary Metabolites. In *Plant Specialized Metabolites: Phytochemistry, Ecology and Biotechnology* (pp. 1-33). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30037-0_4-1
- Hamada, M., Wada, S., Kobayashi, K., y Satoh, N. (2005). Ci-Rga, a gene encoding an MtN3/saliva family transmembrane protein, is essential for tissue differentiation during embryogenesis of the ascidian *Ciona intestinalis*. *Differentiation*, 73(7), 364-376. <https://doi.org/10.1111/j.1432-0436.2005.00037.x>
- Han, Z., Zhu, M., Wan, X., Zhai, X., Ho, C. T., y Zhang, L. (2024). Food polyphenols and Maillard reaction: regulation effect and chemical mechanism. *Critical reviews in food science and nutrition*, 64(15), 4904-4920. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2146653>
- Harish, B. S., y Uppuluri, K. B. (2017). Sucrose Transforming Enzymes: Hydrolysis and Isomerization. In *Microbial Enzyme Technology in Food Applications* (pp. 85-101). CRC Press.
- Harms, V., Schröder, B., Oberhauser, C., Tran, C. D., Winkler, S., Dräger, G., y Kirschning, A.

- (2020). Methyl-shifted farnesyldiphosphate derivatives are substrates for sesquiterpene cyclases. *Organic Letters*, 22(11), 4360-4365.
<https://doi.org/10.1021/acs.orglett.0c01345>
- He, M., Qin, C. X., Wang, X., y Ding, N. Z. (2020). Plant unsaturated fatty acids: biosynthesis and regulation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 390.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00390>
- Hernández, J. V., Galarza, M. D. L. A., Alvarado, A. D., García, C. O., Monter, Á. V., y Mancera, H. A. Z. (2021). Características del fruto de vainilla verde y beneficiada cosechados a diferente edad. *Acta agrícola y pecuaria*, 7(1), 1-12
- Hernández-Bernal, A. F., Gregorio-Jorge, J., y León, P. (2022). El papel de los azúcares como moléculas de señalización en las plantas. TIP. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas* 25, e519.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.519>
- Huang, H., Chu, B., Yuan, Q., Gao, P., Zhong, W., Yin, J., ... y Wang, X. (2024). Effect of enzymatic Maillard reaction conditions on physicochemical properties, nutrition, fatty acids composition and key aroma compounds of fragrant rapeseed oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(4), 1953-1961.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.13082>
- Huang, L., Ho, C. T., y Wang, Y. (2021). Biosynthetic pathways and metabolic engineering of spice flavors. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(12), 2047-2060. doi:10.1080/10408398.2020.176954
- Igartúa, D., y Sceni, P. (2023). Abordaje experimental para la enseñanza y el aprendizaje de la reacción de Maillard en química de los alimentos. Universidad Nacional Autónoma de México; *Educación Química*; 34; 9-2023; 2-14
<http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2023.4.86124e>
- Kathuria, D., Gautam, S., y Thakur, A. (2023). Maillard reaction in different food products: Effect on product quality, human health and mitigation strategies. *Food Control*, 153, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109911>
- Ke, C., y Li, L. (2023). Influence mechanism of polysaccharides induced Maillard reaction on plant proteins structure and functional properties: A review. *Carbohydrate Polymers*, 302, 120430. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120430>
- Khan, F. S., Gan, Z. M., Li, E. Q., Ren, M. K., Hu, C. G., y Zhang, J. Z. (2022). Transcriptomic and physiological analysis reveals interplay between salicylic acid and drought stress in citrus tree floral initiation. *Planta*, 255(1), 24.
<https://doi.org/10.1007/s00425-021-03801-2>
- Khan, N., Bano, A., Ali, S., y Babar, M. A. (2020). Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. *Plant Growth Regulation*, 90(2), 189-203. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00571-x>
- Klee, H. J., y Tieman, D. M. (2018). The genetics of fruit flavour preferences. *Nature Reviews Genetics*, 19(6), 347-356. <https://doi.org/10.1038/s41576-018-0002-5>
- Klemens, P. A., Patzke, K., Deitmer, J., Spinner, L., Le Hir, R., Bellini, C., ... y Neuhaus, H. E. (2013). Overexpression of the vacuolar sugar carrier AtSWEET16 modifies

- germination, growth, and stress tolerance in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 163(3), 1338-1352. <https://doi.org/10.1111/j.1432-0436.2005.00037.x>
- Kruger, N. J., y Von Schaewen, A. (2003). The oxidative pentose phosphate pathway: structure and organisation. *Current opinion in plant biology*, 6(3), 236-246.
- Li, L., Wu, H. X., Ma, X. W., Xu, W. T., Liang, Q. Z., Zhan, R. L., y Wang, S. B. (2020). Transcriptional mechanism of differential sugar accumulation in pulp of two contrasting mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Genomics*, 112(6), 4505-4515. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2020.07.038>
- Lin, I. W., Sosso, D., Chen, L. Q., Gase, K., Kim, S. G., Kessler, D., ... y Frommer, W. B. (2014). Nectar secretion requires sucrose phosphate synthases and the sugar transporter SWEET9. *Nature*, 508(7497), 546-549. <https://doi.org/10.1038/nature13082>
- Liu, H. T., Lyu, W. Y., Tian, S. H., Zou, X. H., Zhang, L. Q., Gao, Q. H., ... y Duan, K. (2019). The SWEET family genes in strawberry: identification and expression profiling during fruit development. *South African Journal of Botany*, 125, 176-187. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.07.002>
- Liu, H., Ma, L., Chen, J., Zhao, F., Huang, X., Dong, X., ... y Qin, L. (2023). Effect of aliphatic aldehydes on flavor formation in glutathione-ribose Maillard reactions. *Foods*, 12(1), 217. <https://doi.org/10.3390/foods12010217>
- Liu, Z., Liang, T., y Kang, C. (2023). Molecular bases of strawberry fruit quality traits: Advances, challenges, and opportunities. *Plant Physiology*, 193(2), 900-914
- Liu, S., Sun, H., Ma, G., Zhang, T., Wang, L., Pei, H., ... y Gao, L. (2022). Insights into flavor and key influencing factors of Maillard reaction products: A recent update. *Frontiers in Nutrition*, 9, 973677. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.973677>
- Liu, X., Xia, B., Hu, L. T., Ni, Z. J., Thakur, K., y Wei, Z. J. (2020). Maillard conjugates and their potential in food and nutritional industries: A review. *Food frontiers*, 1(4), 382-397. <https://doi.org/10.1002/fft2.43>
- Liu, Y., Lei, X., Deng, B., Chen, O., Deng, L., y Zeng, K. (2022). Methionine enhances disease resistance of jujube fruit against postharvest black spot rot by activating lignin biosynthesis. *Postharvest Biology and Technology*, 190, 111935. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111935>
- Lü, J., Tao, X., Yao, G., Zhang, S., y Zhang, H. (2020). Transcriptome analysis of low-and high-sucrose pear cultivars identifies key regulators of sucrose biosynthesis in fruits. *Plant and Cell Physiology*, 61(8), 1493-1506. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcaa068>
- Luo, Y., Li, S., y Ho, C.-T. (2021). Key Aspects of Amadori Rearrangement Products as Future Food Additives. *Molecules*, 26(14), 4314. <https://doi.org/10.3390/molecules26144314>
- Lv, Y. Q., Li, D., Wu, L. Y., Zhu, Y. M., Ye, Y., Zheng, X. Q., ... y Ye, J. H. (2022). Sugar signal mediates flavonoid biosynthesis in tea leaves. *Horticulture Research*, 9, uhac049. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac049>
- Mabou, F. D., y Yossa, I. B. N. (2021). TERPENES: Structural classification and biological

- activities. *IOSR J Pharm Biol Sci*, 16, 25-40.
- Maga, J. A., y Katz, I. (1981). The chemistry of oxazoles and oxazolines in foods. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 14(3), 295-307.
<https://doi.org/10.1080/10408398109527307>
- Mahanta, B. P., Bora, P. K., Kemprai, P., Borah, G., Lal, M., y Haldar, S. (2021). Thermolabile essential oils, aromas and flavours: Degradation pathways, effect of thermal processing and alteration of sensory quality. *Food Research International*, 145, 110404. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110404>
- Marchesino, M. A., López, P. L., Guerberoff Enemark, G. K., y Olmedo, R. H. (2020). Los procesos de fritura y su relación con los valores nutricionales y la inocuidad: una visión integral desde la seguridad alimentaria. *Nexo agropecuario* 8(1), 43-51.
<http://hdl.handle.net/11336/144678>
- Marchiosi, R., dos Santos, W. D., Constantin, R. P., de Lima, R. B., Soares, A. R., Finger-Teixeira, A., ... y Ferrarese-Filho, O. (2020). Biosynthesis and metabolic actions of simple phenolic acids in plants. *Phytochemistry Reviews*, 19(4), 865-906.
<https://doi.org/10.1007/s11101-020-09689-2>
- Marcinkowska, M. A., y Jeleń, H. H. (2022). Role of sulfur compounds in vegetable and mushroom aroma. *Molecules*, 27(18), 6116.
<https://doi.org/10.3390/molecules27186116>
- Mele, M. A., Kang, H. M., Lee, Y. T., y Islam, M. Z. (2020). Terpenoides de uva: importancia del sabor, regulación genética y potencial futuro. *Reseñas críticas en Ciencia y Nutrición de los Alimentos*, 61(9), 1429-1447.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1760203>
- Mortzfeld, F. B., Hashem, C., Vranková, K., Winkler, M., y Rudroff, F. (2020). Pyrazines: Synthesis and industrial application of these valuable flavor and fragrance compounds. *Biotechnology Journal*, 15(11), 2000064.
<https://doi.org/10.1002/biot.202000064>
- Mostafa, S., Wang, Y., Zeng, W., y Jin, B. (2022). Floral scents and fruit aromas: Functions, compositions, biosynthesis, and regulation. *Frontiers in plant science*, 13, 860157.
- Nookaraju, A., Upadhyaya, C. P., Pandey, S. K., Young, K. E., Hong, S. J., Park, S. K., y Park, S. W. (2010). Molecular approaches for enhancing sweetness in fruits and vegetables. *Scientia Horticulturae*, 127(1), 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.014>
- Ohlrogge, J. B.; Jaworski, J. G.; y Post-Beittenmiller, D. (2018) De novo fatty acid biosynthesis. *Lipid metabolism in plants*. CRC Press. 3-32
- Ong, P. K., y Liu, S. Q. Flavor and sensory characteristics of vegetables. *Handbook of vegetables and vegetable processing* 2018, 135-156.
- Parr, H., Bolat, I., y Cook, D. (2023). Identification and categorization of volatile sulfur flavor compounds in roasted malts and barley. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(1), 76-87. <https://doi.org/10.1080/03610470.2021.2003669>
- Pathak, G., Dudhagi, S. S., Raizada, S., Singh, R. K., Sane, A. P., & Sane, V. A. (2023). Phosphomevalonate kinase regulates the MVA/MEP pathway in mango during

- ripening. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 174-185.
- Pattyn, J., Vaughan-Hirsch, J., y Van de Poel, B. (2021). The regulation of ethylene biosynthesis: a complex multilevel control circuitry. *New Phytologist*, 229(2), 770-782.
- Paulino, B. N., Silva, G. N., Araujo, F. F., Neri-Numa, I. A., Pastore, G. M., Bicas, J. L., y Molina, G. (2022). Beyond natural aromas: The bioactive and technological potential of monoterpenes. *Trends in Food Science & Technology*, 128, 188-201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.006>
- Pavagadhi, S., y Swarup, S. (2020). Metabolomics for evaluating flavor-associated metabolites in plant-based products. *Metabolites*, 10(5), 197. <https://doi.org/10.3390/metabo10050197>
- Pech, JC.; Purgatto, E.; Bouzayen, M.; y Latché A. (2018). Etileno y maduración de frutas. En: Roberts JA, ed. *Revisiónes anuales de plantas en línea* 44. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0483>
- Petersen, M., Hans, J., y Matern, U. (2010). Biosynthesis of phenylpropanoids and related compounds. *Annual Plant Reviews Volume 40: Biochemistry of Plant Secondary Metabolism*, 182-257. (49). <https://doi.org/10.1002/9781444320503.ch4>
- Pinto, T., Aires, A., Cosme, F., Bacelar, E., Morais, M. C., Oliveira, I., Ferreira-Cardoso, J., Anjos, R., Vilela, A., y Gonçalves, B. (2021). Bioactive (Poly)phenols, Volatile Compounds from Vegetables, Medicinal and Aromatic Plants. *Foods*, 10(1), 106. <https://doi.org/10.3390/foods10010106>
- Provost, J. (2019). The Maillard Reaction. In *Food Aroma Evolution* (pp. 281-291). CRC Press.
- Qaderi, M. M., Martel, A. B., y Strugnelli, C. A. (2023). Environmental Factors Regulate Plant Secondary Metabolites. *Plants*, 12(3), 447. <https://doi.org/10.3390/plants12030447>
- Qin, M.; Zhou, J.; Luo, Q.; Zhu, J.; Yu, Z.; Zhang, D.; Ni, D.; Chen, Y. (2024). The Key Aroma Components of Steamed Green Tea Decoded by Sensomics and Their Changes under Different Withering Degree. *Food Chem.*, 439, 138176. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138176>
- Quick, W. P., y Schaffer, A. A. (2017). Sucrose metabolism in sources and sinks. *Photoassimilate Distribution Plants and Crops Source-Sink Relationships*, 115-158.
- Ramírez-Montes, S., Rodríguez-Ávila, J. A., Santos-López, E. M., Galán-Vidal, C. A., y Tavizón-Pozos, J. A. (2023). Clasificación de aceites vegetales comestibles de acuerdo con su degradación. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11, 1-4. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial.10220>
- Ramos, M., Bustillos, R., Santolalla, S., Tuesta, T., Silva-Paz, R., y Jordán-Suárez, O. (2023). Effect of five cooking methods on the physicochemical, nutritional and sensory characteristics of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Scientia Agropecuaria*, 14(2).
- Rhodes, J. M., y Wooltorton, L. S. C. (1978). The biosynthesis of phenolic compounds in wounded plant storage. *Biochemistry of wounded plant tissues*, 243-286.

- Riaz, M., Zia-Ul-Haq, M., y Dou, D. (2021). Chemistry of carotenoids. In *Carotenoids: structure and function in the human body* (pp. 43-76). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46459-2_2
- Salehi, F. (2021). Rheological and physicochemical properties of vegetable juices and concentrates: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), e15326. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15326>
- Sathasivam, R., Radhakrishnan, R., Kim, J. K., y Park, S. U. (2021). An update on biosynthesis and regulation of carotenoids in plants. *South African Journal of Botany*, 140, 290-302. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.05.015>
- Schieber, A., y Wüst, M. (2020). Volatile phenols—Important contributors to the aroma of plant-derived foods. *Molecules*, 25(19), 4529. <https://doi.org/10.3390/molecules25194529>
- Schmid, C., Brockhoff, A., Shoshan-Galeczki, Y. B., Kranz, M., Stark, T. D., Erkaya, R., ... y Hofmann, T. (2021). Comprehensive structure-activity-relationship studies of sensory active compounds in licorice (*Glycyrrhiza glabra*). *Food Chemistry*, 364, 130420. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130420>
- Shahidi, F., y Hossain, A. (2022). Role of Lipids in Food Flavor Generation. *Molecules*, 27(15), 5014. <https://doi.org/10.3390/molecules27155014>
- Shen, Y. P., Niu, F. X., Yan, Z. B., Fong, L. S., Huang, Y. B., y Liu, J. Z. (2020). Recent advances in metabolically engineered microorganisms for the production of aromatic chemicals derived from aromatic amino acids. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 407. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00407>
- Shi, J., Cao, C., Xu, J., y Zhou, C. (2020). Research advances on biosynthesis, regulation, and biological activities of apocarotenoid aroma in horticultural plants. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 2526956. <https://doi.org/10.1155/2020/2526956>
- Simkin, A. J. (2021). Carotenoids and apocarotenoids in planta: Their role in plant development, contribution to the flavour and aroma of fruits and flowers, and their nutraceutical benefits. *Plants*, 10(11), 2321. <https://doi.org/10.3390/plants10112321>
- Sohail, A., Al-Dalali, S., Wang, J., Xie, J., Shakoar, A., Asimi, S., ... y Patil, P. (2022). Aroma compounds identified in cooked meat: A review. *Food Research International*, 157, 111385. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111385>
- Starowicz, M., y Zieliński, H. (2019). How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? *Food Reviews International*, 35(8), 707-725. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600538>
- Stevens, N., y Allred, K. (2022). Antidiabetic Potential of Volatile Cinnamon Oil: A Review and Exploration of Mechanisms Using In Silico Molecular Docking Simulations. *Molecules*, 27(3), 853. <https://doi.org/10.3390/molecules27030853>
- Sun, A., Chen, L., Wu, W., Soladoye, O. P., Zhang, Y., y Fu, Y. (2023). The potential meat flavoring generated from Maillard reaction products of wheat gluten protein hydrolysates-xylose: Impacts of different thermal treatment temperatures on flavor. *Food Research International*, 165, 112512.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112512>
- Tan, X.; Song, W.; Chen, X.; Liu, L.; y Wu, J. (2020). Recent advances in biocatalytic derivatization of L-tyrosine. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 9907-9920. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10949-6>
- Tang, Y., Zhou, C., Yu, Z., Jiang, M., Chen, Y., Wang, H., y Yang, Z. (2024). Formation of lipid-derived volatile products through lipoxygenase (LOX)-and hydroperoxide lyase (HPL)-mediated pathway in oat, barley and soy bean. *Food Chemistry: X*, 22, 101514. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101514>
- Ties, P., y Barringer, S. (2012). Influence of lipid content and lipoxygenase on flavor volatiles in the tomato peel and flesh. *Journal of food science*, 77(7), C830-C837. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02775.x>
- Tomé-Rodríguez, S., Ledesma-Escobar, C. A., Penco-Valenzuela, J. M., Calderon-Santiago, M., y Priego-Capote, F. (2022). Metabolic patterns in the lipoxygenase pathway associated to fruitiness attributes of extra virgin olive oil. *Journal of Food Composition and Analysis*, 109, 104478. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104478>
- Trillo-Hernández, E. A., Orozco-Avitia, J. A., Ojeda-Contreras, Á. J., Berumen-Varela, G., Ochoa-Jiménez, V. A., Troncoso-Rojas, R., ... y Tiznado-Hernández, M. E. (2021). Expression analysis of genes encoding rhamnogalacturonan lyase isoenzymes during tomato fruit development and ripening. *Revista fitotecnica mexicana*, 44(4), 529-536.
- Troise, A. D., Berton-Carabin, C. C., Vitaglione, P., y Fogliano, V. (2020). Formation of taste-active pyridinium betaine derivatives is promoted in thermally treated oil-in-water emulsions and alkaline pH. *Journal of agricultural and food chemistry*, 68(18), 5180-5188. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01446>
- Uchida, K., Terada, N., Sanada, A., Myoda, T., y Koshio, K. (2022). Development of a practical method to produce GABA rich green tea by vapor treatment with trans-2-hexenal. *Journal of ISSAAS*, 28(2), 52-61.
- Vázquez-Cuecuecha, O. G., García-Gallegos, E., y Chávez-Gómez, J. A. (2023). Caracterización física y química de los frutos de tres variedades de Prunus persica L. Batsch en Tlaxcala. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(5), 90-99. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3197>
- Verma, D. K., y Srivastav, P. P. (2020). Extraction, identification and quantification methods of rice aroma compounds with emphasis on 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) and its relationship with rice quality: A comprehensive review. *Food Reviews International*, 38(2), 111-162. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1720231>
- Vincenti, S., Mariani, M., Alberti, J. C., Jacopini, S., Brunini-Bronzini de Caraffa, V., Berti, L., y Maury, J. (2019). Biocatalytic synthesis of natural green leaf volatiles using the lipoxygenase metabolic pathway. *Catalysts*, 9(10), 873. <https://doi.org/10.3390/catal9100873>
- Wang, H. Y., Qian, H., y Yao, W. R. (2011). Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity. *Food chemistry*, 128(3), 573-584.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.075>
Wang, Y. ; Li, Z.; Xu, M. ; Xiao, Z.; Liu, C. ; Du, B. ; Xu, D. ; Li, L . (2023). Signal molecules regulate the synthesis of secondary metabolites in the interaction between endophytes and medicinal plants. *Processes*, 11(3), 849.
- <https://doi.org/10.3390/pr11030849>
Wang, Y., Xie, J., Zhang, C., Xu, Y., y Yang, X. (2022). Effect of lipid on formation of Maillard and lipid-Maillard meaty flavour compounds in heated cysteine-xylose-methyl linoleate system. *Flavour and Fragrance Journal*, 37(5), 274-284.
- <https://doi.org/10.1002/ffj.3710>
Werkhoff, P., Guntert, M., y Hopp, R. (1992). Dihydro-1, 3, 5-dithiazines: Unusual flavor compounds with remarkable organoleptic properties. *Food Reviews International*, 8(3), 391-442. <https://doi.org/10.1080/87559129209540947>
- Xu, S., Deng, J., Wu, S., Fei, Q., Lin, D., Chen, H., ... y Ma, F. (2024). Dynamic changes of active components and volatile organic compounds in rosa roxburghii fruit during the process of maturity. *Foods*, 13(18), 2893.
- <https://doi.org/10.3390/foods13182893>
Xuan, Y. H., Hu, Y. B., Chen, L. Q., Sosso, D., Ducat, D. C., Hou, B. H., y Frommer, W. B. (2013). Functional role of oligomerization for bacterial and plant SWEET sugar transporter family. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(39), E3685-E3694 <https://doi.org/10.1073/pnas.1311244110>
- Yadav, R. K., Singh, M., Roy, S., Ansari, M. N., Saeedan, A. S., y Kaithwas, G. (2018). Modulation of oxidative stress response by flaxseed oil: Role of lipid peroxidation and underlying mechanisms. *Prostaglandins & other lipid mediators*, 135, 21-26.
- <https://doi.org/10.1016/j.prostaglandins.2018.02.003>
Yang, P., Wang, H., Cao, Q., Song, H., Xu, Y., y Lin, Y. (2023). Aroma-active compounds related to Maillard reaction during roasting in Wuyi Rock tea. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104954.
- <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104954>
Yang, S., Li, D., Li, S., Yang, H., y Zhao, Z. (2022). GC-MS metabolite and transcriptome analyses reveal the differences of volatile synthesis and gene expression profiling between two apple varieties. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(6), 2939. <https://doi.org/10.3390/ijms23062939>
- Yao, R., Fu, W., Du, M., Chen, Z.-X., Lei, A.-P., y Wang, J.-X. (2022). Carotenoids Biosynthesis, Accumulation, and Applications of a Model Microalga *Euglenagracilis*. *Marine Drugs*, 20(8), 496. <https://doi.org/10.3390/md20080496>
- Yeo, H., Balagiannis, D. P., Koek, J. H., y Parker, J. K. (2022). Comparison of odorants in beef and chicken broth—Focus on thiazoles and thiazolines. *Molecules*, 27(19), 6712. <https://doi.org/10.3390/molecules27196712>
- Yu, H., Zhang, R., Yang, F., Xie, Y., Guo, Y., Yao, W., y Zhou, W. (2021). Control strategies of pyrazines generation from Maillard reaction. *Trends in Food Science & Technology*, 112, 795-807. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.028>
- Yuan, Y., Ren, S., Liu, X., Su, L., Wu, Y., Zhang, W., ... y Zhang, Y. (2022). SIWRKY35

- positively regulates carotenoid biosynthesis by activating the MEP pathway in tomato fruit. *New Phytologist*, 234(1), 164-178.
<https://doi.org/10.1111/nph.17977>
- Zhang, J., Zhang, M., Bhandari, B., y Wang, M. (2023). Basic sensory properties of essential oils from aromatic plants and their applications: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(20), 6990-7003.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2177611>
- Zhang, L., Liu, T., Xue, Y., Liu, C., Ru, H., Dong, M., y Yu, Z. (2016). Effects of Drying Methods on the Aroma Components and Quality of *Capsella Bursa-Pastoris* L. *Journal of Food Process Engineering*, 39(2), 107-120.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12204>
- Zhang, X., Wang, X., Zhang, Y., Wang, F., Zhang, C., y Li, X. (2023). Development of isopentenyl phosphate kinases and their application in terpenoid biosynthesis. *Biotechnology Advances*, 64, 108124.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108124>
- Zhang, Y., Li, W., y Xie, J. (2024). Unraveling the mysteries of melanoidins: insights into formation, structure, and health potential in fermented blacken foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-15.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2433610>
- Zhao, Y., Zuo, J., Yuan, S., Shi, W., Shi, J., Feng, B., y Wang, Q. (2021). UV-C Treatment Maintains the Sensory Quality, Antioxidant Activity and Flavor of Pepino Fruit during Postharvest Storage. *Foods*, 10(12), 2964.
<https://doi.org/10.3390/foods10122964>
- Žuljević, S. O., y Spaho, N. (2024). Bread Aroma and Flavour Creation Factors. IntechOpen
<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.115114>

Compuestos químicos y actividad biológica de *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng: una revision

Chemical compounds and biological activity of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng: a review

Eder Beitia¹

<https://orcid.org/0000-0001-9596-2357>

Miguel J. Vega-Quiel¹

<https://orcid.org/0000-0001-7841-4770>

Ariadna Batista C.¹

<https://orcid.org/0000-0002-4284-1102>

Vielka Caballero¹

<https://orcid.org/0000-0003-4373-8665>

Roberto Guevara¹

<https://orcid.org/0009-0007-6665-8605>

Rogelio Santanach²

<https://orcid.org/0009-0004-6264-6613>

¹Universidad Autónoma de Chiriquí, Maestría en Ciencias Química con Énfasis en Inocuidad Alimentaria, Centro de investigación de Productos Naturales y Biotecnología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas.

²Laboratorio de Microbiología, Escuela de Biología, Universidad Autónoma de Chiriquí, David, Panamá

Autor correspondiente: eder.beitia@unachi.ac.pa

Enviado: 4 de abril de 2025. Aceptado: 12 de noviembre de 2025

<https://doi.org/10.59722/rcvn.v3i2.901>

Resumen

Los compuestos químicos presentes en el aceite esencial de los extractos acuosos y apolares de las hojas verdes de la planta *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng (conocido comúnmente como oreganón), tienen propiedades bioactivas de efecto antibacteriano. En el presente trabajo se realizó una revisión bibliográfica, sobre la información de la actividad antibacteriana y de la determinación estructural de los compuestos químicos del aceite esencial, los extractos acuosos y apolares en la especie *P. amboinicus* utilizando las referencias de bases de datos científicas disponibles en diferentes motores de búsqueda (Google Scholar, Scopus, PubMed, Web of Science, ProQuest, SciELO) referentes al estado del arte y del uso de diferentes técnicas instrumentales. La revisión se basa en 50 artículos científicos que incluyen revisiones previas e investigaciones entre los meses de enero a abril de 2025, seleccionando aquellos artículos de los últimos cinco años y algunos otros artículos relevantes de los últimos diez años. Las técnicas investigadas incluyen cromatografía líquida

de alta resolución (HPLC, LS/MS), cromatografía de gases acopladas a espectrometría de masas (GC/MS), difracción de rayos X, entre otros múltiples métodos con los que se detectaron compuestos provenientes del metabolismo secundario de las plantas. Los componentes volátiles más relevantes del aceite esencial y el extracto acuoso fueron el carvacrol, timol, citral, β -cimeno entre otros, y los no volátiles incluyen flavonoides, fenoles y alcaloides en los extractos apolares con actividad biológica. La actividad biológica investigada fue el efecto inhibitor sobre microorganismos gram positivos y gram negativos, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Bacillus subtilis*. Los métodos utilizados fueron la técnica de microdilución en caldo, recuento en placa viable en medio selectivo, sensibilidad bacteriana al aceite esencial, mediante la determinación de halos de inhibición. Estos aportes bibliográficos sugieren que los métodos instrumentales permiten detectar, identificar y cuantificar la estructura química de los metabolitos secundarios del aceite esencial, presentes en las hojas verdes de la especie vegetal *P. amboinicus* con actividad biológica bactericida contra microorganismos potencialmente causantes de enfermedades en los seres humanos.

Palabras clave

Actividad bactericida, análisis estructural, compuesto químico, fitoquímicos, microorganismo.

Abstract

The chemical compounds present in the essential oil of the aqueous and apolar extracts of the green leaves of the plant *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng (commonly known as oregano), have bioactive properties with an antibacterial effect. In this work, a bibliographic review was carried out on the information on the antibacterial activity and the structural determination of the chemical compounds of the essential oil, the aqueous and apolar extracts in the species *P. amboinicus* using references from scientific databases available in different search engines (Google Scholar, Scopus, PubMed, Web of Science, ProQuest, SciELO) referring to the state of the art and the use of different instrumental techniques. The review is based on 50 scientific articles that include previous reviews and research between the months of January to April 2025, selecting those articles from the last five years and some other relevant articles from the last ten years. The techniques investigated include high performance liquid chromatography (HPLC, LS/MS), gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC/MS), X-ray diffraction, among other multiple methods with which compounds from the secondary metabolism of plants were detected. The most relevant volatile components of the essential oil and the aqueous extract were carvacrol, thymol, citral, β -cymene among others, and the non-volatile components include flavonoids, phenols and alkaloids in the apolar extracts with biological activity. The biological activity investigated was the inhibitory effect on gram-positive and gram-negative microorganisms, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Bacillus subtilis*. The

methods used were the broth microdilution technique, viable plate count in selective medium, bacterial sensitivity to the essential oil, by determining inhibition halos. These bibliographic contributions suggest that instrumental methods allow the detection, identification and quantification of the chemical structure of the secondary metabolites of the essential oil, present in the green leaves of the plant species *P. amboinicus* with bactericidal biological activity against microorganisms potentially causing diseases in humans.

Keywords

Bactericidal activity, chemical compound, phytochemicals, microorganism, structural analysis.

Introducción

El interés por conocer los principales componentes químicos de las plantas es fundamental para comprender su valor tanto culinario como medicinal. Actualmente, existen tecnologías capaces de determinar la composición química de las plantas, entre las cuales destaca la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas. Esta combinación representa una herramienta clave para separar, identificar y cuantificar diversos compuestos. Gracias a su alta resolución, sensibilidad y rapidez en los análisis, esta técnica se ha convertido en un método rutinario ampliamente utilizado por la comunidad científica (López-Martínez et al., 2023).

El oreganón *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng) es una planta suculenta, aromática, perenne, que se encuentra en regiones tropicales y subtropicales, con origen en Asia y África (Malpica-Acosta et al., 2024). Una de las especies más documentadas de esta familia es *P. amboinicus*; conocida comúnmente como borraja india, tomillo español, menta mexicana, orégano cubano u orégano francés, y es una planta carnosa y suculenta, muy popular por su sabor y olor característicos, la cual crece, de forma natural, en zonas tropicales y regiones cálidas de África, Asia, Australia y América (Almenares-Rosales et al., 2024). Los aceites esenciales obtenidos del *P. amboinicus* son ricos en triterpenoides, diterpenos, monoterpenos, sesquiterpenos, flavonoides, compuestos fenólicos, quinonas y alquilcatecoles de cadena larga. Además, las hojas de algunas especies como *P. amboinicus* se utilizan como alimento en carnes y aves debido a su intenso sabor y altas propiedades

aromáticas (Ahamed et al., 2023). Estos bioproductos se distinguen por contener ciertos compuestos de origen natural que forman parte de los mecanismos de defensa de las plantas, y se clasifican en compuestos nitrogenados, fenólicos y terpenoides (Salazar et al., 2018). En el caso de los aceites esenciales, donde se tienen metabolitos volátiles se recomienda el uso regular de la cromatografía de gases acoplada al espectro de masas (GC/MS) para identificar sustancias derivadas del metabolismo secundario (Pereira et al., 2021, Jaramillo-Colorado et al., 2022).

Materiales y Métodos

Se llevó a cabo una revisión sistemática del estado del arte de literatura científica publicada en diferentes plataformas web: Google Académico, Scopus, Web of Science, SciELO, Redalyc, Dialnet y JSTOR, etc., sobre la determinación de los compuestos químicos y las actividades antimicrobianas del aceite esencial, así como de extractos apolares y acuosos de *P. amboinicus*. En la revisión, se utilizaron los términos de búsqueda (fórmula booleana): composición química, determinación estructural de compuestos químicos, actividad antibacteriana del aceite esencial y extractos acuoso como apolar. El criterio de inclusión utilizado abarcó estudios experimentales, observacionales, revisiones sistemáticas y la fecha de publicación de los últimos 5 o 10 años. El criterio de exclusión que se consideró fue artículos muy antiguos y el idioma que no se pudiera leer, y por último estudios con sesgos o errores metodológicos, o que no proporcionaran resultados relevantes.

Aspectos generales de la planta

En la figura 1 se observa las estructuras de *P. amboinicus*, conocido como orégano cubano o borraja india, es una planta perenne suculenta y aromática de la familia *Lamiaceae*, fácil de cultivar, con hojas carnosas, peludas y de sabor fuerte a orégano, utilizada en cocina y medicina tradicional por sus propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas y antioxidantes, gracias a sus compuestos fenólicos y flavonoides. En el envés de las hojas se visualiza la presencia de abundantes tricomas pluricelulares y glandulares. En general, se

concuerta en que el orégano francés (*P. amboinicus*), sinónimos: *Coleus amboinicus* Lour., *Coleus aromaticus* Benth, *Plectranthus aromaticus* (Benth.) Roxb., en especial, las hojas frescas son suculentas, tienen olor penetrante, al tacto se percibe una suave pilosidad por el haz y rugosidad por el envés dado lo saliente de las nervaduras (Pupo-Blanco et al., 2024). En el presente estudio, la inflorescencia tiene un color blanco púrpura. En un estudio similar de Punet Kumar y Kumar (2020) las flores tienen un cáliz acampanado y los pétalos son lisos por dentro con dos haces, el superior ovado y delgado, y el inferior estrecho. La corola es de color púrpura pálido y cinco veces más larga que el cáliz, con un tubo corto.

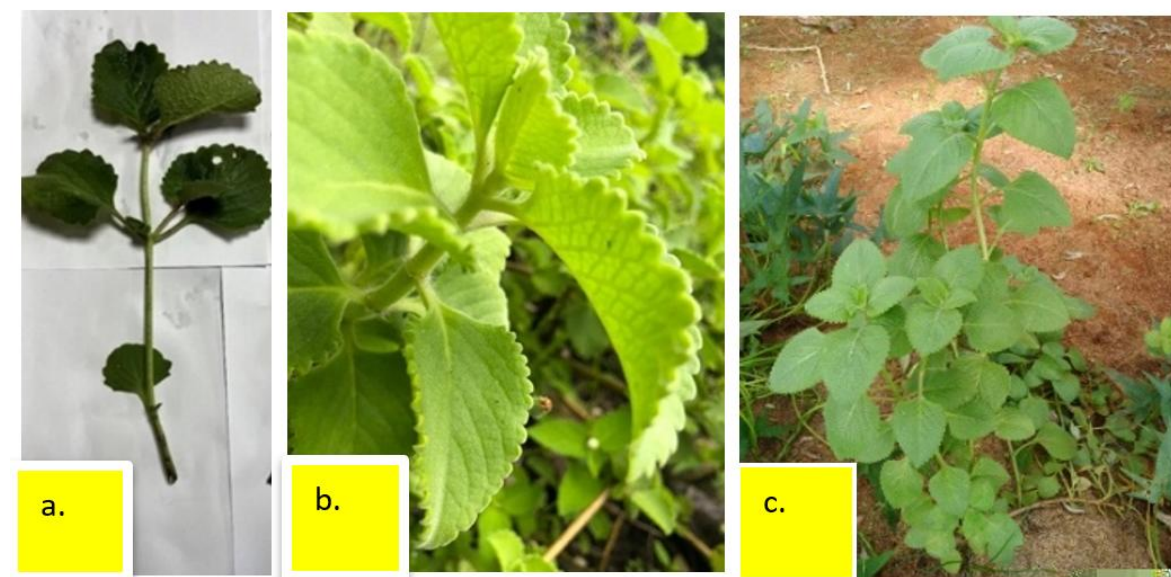


Figura 1. a. Estructura completa del tallo vegetativo. b. Hojas jóvenes y maduras, c. Planta completa *Plectranthus amboinicus*.

En la figura 2, se observa la estructura de los compuestos químicos aromáticos del aceite esencial de *P. amboinicus* y en la figura 3 se observan las estructuras no volátiles en los extractos acuosos y apolares de *P. amboinicus* identificados por las técnicas instrumentales anteriormente mencionadas. Por ejemplo, estudios del el aceite esencial, Arumugam et al. (2016) determinó en el aceite esencial obtenido de las hojas un total de 76 componentes volátiles y 30 compuestos no volátiles pertenecientes a diferentes clases de fitoquímicos como monoterpenoides, diterpenoides, triterpenoides, sesquiterpenoides, fenólicos,

flavonoides, ésteres, alcoholes y aldehídos identificados por cromatografía de gas acoplada a masa (GC/MS) para los compuestos volátiles, y los compuestos no volátiles se identificaron por UV/NMR/UPLC/MS/HPLC.

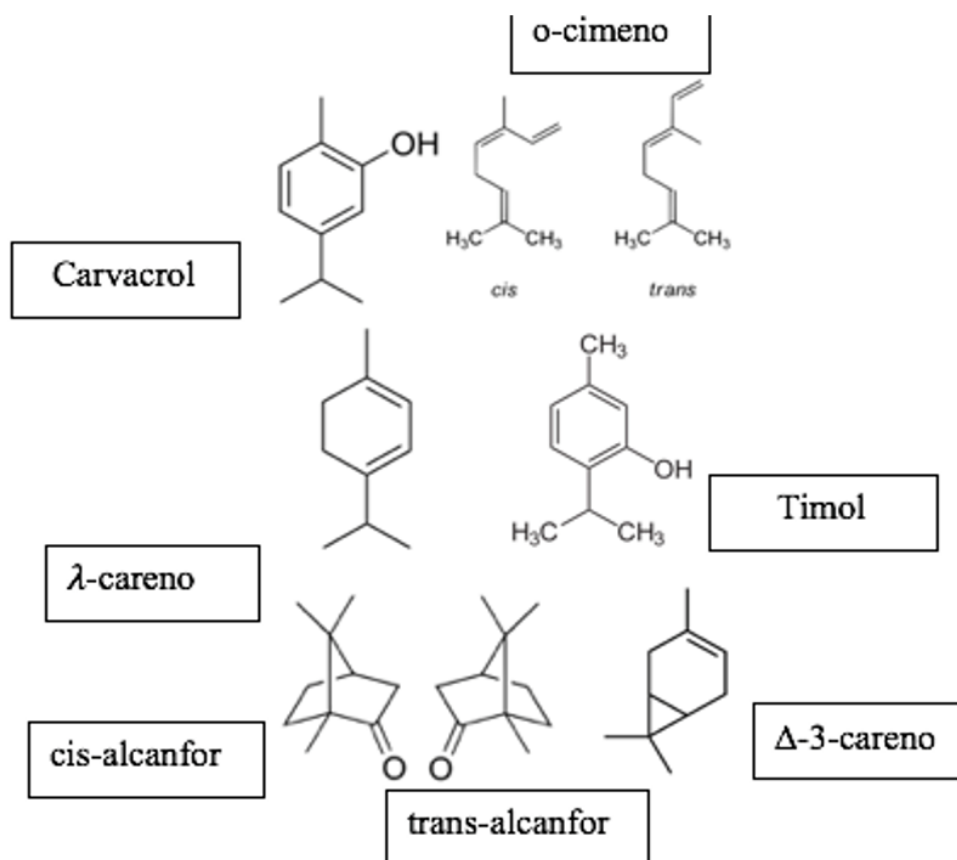


Figura 2. Compuestos aromáticos y terpenoides presentes en el aceite esencial de *Plectranthus amboinicus*. Fuente: Hassani et al. (2012)

En la figura 3, se observan los compuestos químicos no volátiles del extracto acuoso de *P. amboinicus*. De manera similar, Chang et al. (2010) analizaron la composición química de *P. amboinicus* como extracto acuoso, en lugar del aceite esencial, obteniéndose los componentes principales Δ -3-careno, β -terpineno, alcanfor y carvacrol. En el mismo sentido, El-Hawary et al. (2012), detectaron la fitoquímica preliminar de sustancias volátiles al vapor, esteroides y/o triterpenos en todas las partes de la planta a través de fragmentos del perfil genético 58 patrones de fragmentos, producidos por B-19 (nueve bandas), B-6 para poder discriminar entre *P. amboinicus* y otra variedad vegetal de la misma familia.

Además, el extracto acuoso derivado de *P. amboinicus* contiene carvacrol, que tiene una variedad diversa de polifenoles bioactivos, como ácido rosmarínico, rutina, ácido cafeico, ácido gálico, ácido *p*-cumárico y quercetina (Jaramillo-Colorado et al., 2022).

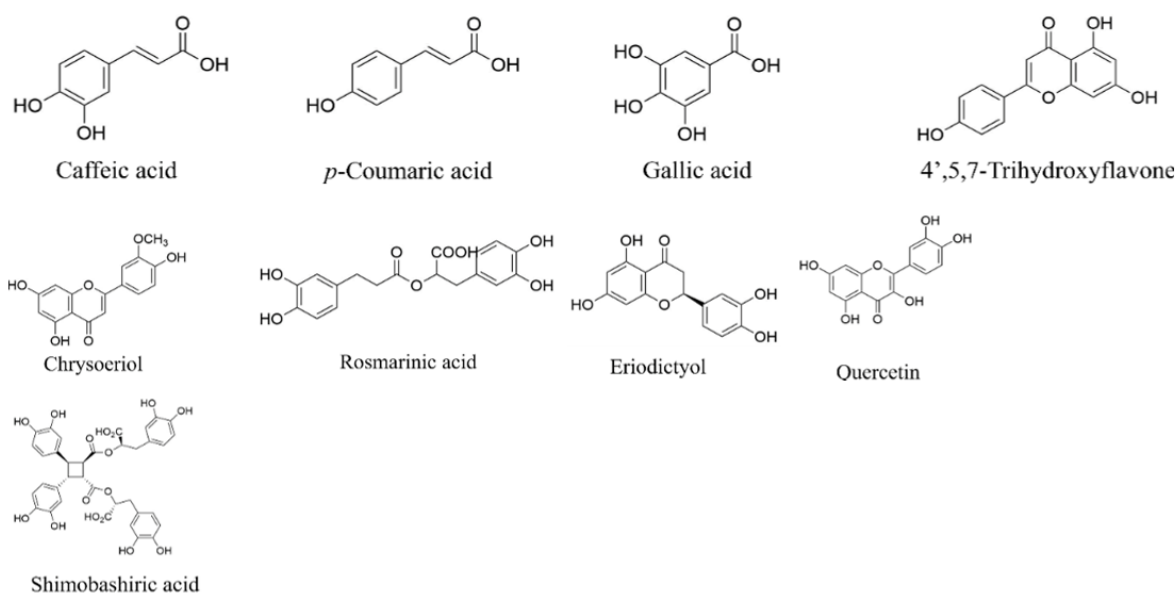


Figura 3. Compuestos químicos no volátiles en el extracto acuoso de *Plectranthus amboinicus*. Fuente: Phattayanon et al. (2024).

En la tabla 1 y tabla 2, se muestran los principales estudios de los compuestos químicos del aceite esencial y del extracto orgánico y acuoso de *P. amboinicus*.

Técnicas instrumentales

Los métodos instrumentales se han utilizado desde épocas antiguas hasta la actualidad, siendo frecuente su empleo en la identificación de compuestos químicos de las plantas. En la Tabla 1 se recopila la información relativa de los compuestos químicos más abundantes identificados mediante técnicas instrumentales. Se observa que estos compuestos volátiles identificados son, en general, monoterpenos, diterpenos, triterpenos. Por otra parte, también se aprecian las diferentes técnicas que se utiliza para identificar estos compuestos como por ejemplo cromatografía líquida de alta resolución y cromatografía de gases

acopladas a espectrometría de masas (L/MS Y GC/MS), cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), difracción de rayos X. Estos resultados se corroboran con lo que indica López-Martínez et al. (2023) en la revisión bibliográfica sobre el método de difracción de rayos X permitió encontrar compuestos no identificados por medio del patrón de difracción de rayos X y la identificación de un compuesto que no había sido reportado para la especie *P. amboinicus*, y se pudo observar en el espectro con color verde: el pirazol que es un compuesto heterocíclico y representante de los más activos, el cual tiene actividades como antimicrobianos; siendo la difracción de rayos x un método exacto y completo para determinar la identidad y estructura de compuestos nuevos o conocidos, y por lo tanto vital para la investigación en química. En el estudio anterior, López-Martínez et al. (2023) identificaron el carvacrol en el “oreganón”, nombre común, el más característico entre las especies estudiadas.

También, Cardona y Díaz (2022) determinaron la composición química mediante cromatografía de gas con detector de masa (CG/MS), donde la mayor proporción de componentes encontrados correspondió al timol y *p*-cimeno. Se identificaron los siguientes nueve compuestos principales por su abundancia: Timol (49,7 %), *p*-cimeno (13,2 %), γ -terpineno (12,8 %), cariofileno (9,2 %), trans- α -bergamoteno (6 %), (+)-4-careno (2,9 %), humuleno (2,5 %), terpinen-4-ol (1,6 %), y óxido cariofileno (1,8 %); de los cuales los compuestos timol y *p*-cimeno son los que se encuentran en mayor proporción en el aceite esencial de *P. amboinicus*.

En otro estudio, Hassani et al. (2012) analizaron el aceite esencial por capilaridad mediante cromatografía de gas y por cromatografía de gas acoplada a masas GC/MS, la composición química del aceite esencial de *P. amboinicus* (Lour.) Spreng (Lamiaceae) de Comoras y los principales compuestos que determinaron fueron carvacrol (23,0 %), alcanfor (22,2 %), Δ -3-careno (15,0 %), γ -terpineno (8,4 %), *o*-cimeno (7,7 %) y α -terpineno (4,8 %). Estos productos representaban el 81,0 % del total del aceite esencial. Este aceite esencial estaba principalmente integrado por monoterpenoides (58,6 %) y compuestos aromáticos (32,1 %). Los sesquiterpenoides (9,3 %) representan un pequeño porcentaje del aceite esencial.

En relación con los estudios mencionados, el reporte de Nguyen et al. (2020) evaluó los componentes químicos, determinándose el contenido total de polifenoles y flavonoides, y la actividad antioxidante de las hojas de *P. amboinicus* en extracto etanólico (IC₅₀). En el extracto etanólico al 70 % de la planta *P. amboinicus*, Morales y Villanueva (2021) encontraron la presencia del flavonoide quercetina (5,419 mg/L) por HPLC.

Tabla 1. Principales compuestos químicos del aceite esencial de *Plectranthus amboinicus*

Principales componentes químicos / Bioactivos	Metodología	Referencia
Carvacrol, undecanal, <i>p</i> -cimeno, óxido de cariofileno, β -selineno	Hidrodestilación clevenger y se analizaron por GC/MS	(Senthilkumar y Venkatesalu, 2010)
Timol, γ -terpineno, β -cariofileno de geranilo, carvacrol	(GC/MS)	(Da Costa et al., 2010)
α -humuleno, undecanal, γ -terpino	UPLC-MS (GC/MS)	(Annadurai y Venugopalan, 2010)
Ácido cafeico, ácido rosmarínico, ácido cumárico, luteolina, quercitina	Se analizaron por GC-FID y GC/MS	(Patel et al., 2010)
Alcanfor, o-cimeno, α -terpineno	(CG/MS)	(Hassani et al., 2012)
3-careno, linalool, acetato de nerol, acetato de geranilo, carvacrol	(CG/MS), HPTLC–DART-HRMS (CG/MS)	(Erny et al., 2012)
Carvacrol, ciclohexanona, cariofileno, óxido cariofileno, bergamoteno, α -cariofileno		(Asiimwe et al., 2014)
Timol, γ -terpineno, cariofileno 4-terpineol, óxido de cariofileno, <i>p</i> -cimeno, γ -terpineno, α -bergamoteno, carvacrol, humuleno		(Pinheiro et al., 2015)
		(Pereira et al., 2021)
		(Bañuelos-Hernández et al., 2020)
		(Cardona y Díaz, 2022)
		(Jaramillo-Colorado et al., 2022)

*Nota: GC/MS (Cromatografía de gases/espectrometría de masas). GC/FID (cromatografía de gases-detector de ionización de llama). GC (Cromatografía de gases). UPLC/MS (cromatografía líquida de ultra eficiencia acoplada a espectrometría de masas). Placas HPTLC de gel de sílice, interfaz DART se instaló en un espectrómetro de masas orbitrap cuadrupolo híbrido (Q Exactive Plus). **Fuente:** (López-Martínez et al., 2023).

En la Tabla 2 se muestran estudios sobre la identificación de los compuestos químicos en

los extractos apolares y acuosos de *P. amboinicus*, tal como lo caracterizó Fierro et al. (s.f) en extracto de la especie en estudio cultivada en Hungría, se encontró un 8.4 % de eugenol; en México, se reporta la presencia de canfor y limoneno, además de vitaminas como B-1 (tiamina), B-2 (riboflavina) y C (ácido ascórbico). En extractos acuosos Asiimwe et al. (2014) determinaron terpenos y ésteres (linalool, nerol acetato, geranilo acetato, carvacrol) mediante cromatografía de gas acoplada a masa (GC/MS); y del extracto apolar de Medeiros et al. (2021) por cromatografía líquida de alta resolución, HPLC, determinó polifenoles y flavonoides.

Tabla 2. Compuestos químicos principales en los extractos orgánicos y acuoso de *Plectranthus amboinicus*

Principales componentes químicos / Bioactivos	Metodología	Referencia
Cirsimaritina, carvacrol, pectolinarigenina, salvigenina, xanthomicrol, β -sitosterol, estigmasterol	Extracción por percolación con etanol al 70 %, y analizados por (RMN) de ^1H y ^{13}C	Pupo-Blanco et al., 2024
Timol, carvacrol, citral	Emulsión acuosa con aceite esencial de <i>P. amboinicus</i> evaluado por (GC/MS)	Castro et al., 2016
Linalol, carvacrol, acetato de geranilo y acetato de nerol, β -cimeno, β -ocimeno, γ -Terpineno	Extracto acuoso por SPME analizado por (GC/MS)	Asiimwe et al., 2014
Principales componentes no volátiles: fenólicos, flavonoides y alcaloides	Extracto acuoso, identificado por (LC/MS)	Phattayanon et al., 2024

Nota: GC/MS (Cromatografía de gases/espectrometría de masas). RMN (Resonancia Magnética Nuclear. LC/MS (Cromatografía líquida combinada con espectrometría de masas).

En la tabla 3 se presentan los resultados de los usos etnobotánicos de *P. amboinicus* centrados en los usos tradicionales de la planta.

Tabla 3. Uso medicinal y culinario etnobotánicos de la especie vegetal en estudio *Plectranthus amboinicus*

Nombre común	Usos	Referencia
El orégano cubano, orégano francés, tomillo español, menta mexicana, oreganón, orégano brujo, orégano orejón, orégano poleo (Rep. Dominicana) o borraja india.	Tiene una gran variedad de usos; se utiliza para condimentar la comida, para fines medicinales, como planta ornamental y además posee altas propiedades nutritivas.	(Vega et al., 2024) (López-Martínez et al., 2023)
	El oreganón se ha usado de forma tradicional como aromatizante, condimento y conservador natural de alimentos debido a su contenido nutricional, intenso olor y sabor.	(Malpica-Acosta et al., 2024)
	Tratamiento de la tos crónica, la bronquitis y el dolor de garganta en la India y el Caribe, y en Cuba se utiliza para tratar las infecciones catarrales y el asma.	(Lukhoba et al., 2006)
	Tratamiento de heridas, fiebre, bronquitis, inflamación uterina, abscesos, asma, hepatitis, laberintitis, amigdalitis, etc.	(Barbosa et al., 2023)

Fuente: López-Martínez et al. (2023).

Por ejemplo, los usos por diferentes grupos étnicos y diferentes culturas, en los cuales se muestra la utilidad para condimentar la comida (especia) y para fines medicinales. En ese sentido, *P. amboinicus* también se cita con frecuencia para el tratamiento de la tos crónica, la bronquitis y el dolor de garganta en la India y el Caribe, y en Cuba se utiliza para tratar las infecciones catarrales y el asma (Lukhoba et al., 2006). En cuanto a la inflamación, las especies se indicaban para el tratamiento de heridas, fiebre, bronquitis, inflamación uterina, abscesos, asma, hepatitis, laberintitis, amigdalitis, inflamación de órganos internos e inflamación inespecífica (Barbosa et al., 2023). En contraste, esta especie ha sido objeto de numerosos estudios y revisiones que confirman sus usos en afecciones tales como resfriado, asma, dolor de cabeza, tos, fiebre, problemas de la piel, desórdenes cardiovasculares, digestivos y genitourinarios, especialmente respecto a su actividad diurética y contra la urolitiasis, entre otros (Orsini, 2020).

Actividad antimicrobiana

En la tabla 4 se observa las actividades antimicrobianas del aceite esencial y los extractos de *P. amboinicus* (orégano francés) posee una significativa actividad antimicrobiana contra bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, así como propiedades antifúngicas, antibacterianas y antiinflamatorias, debido a sus compuestos como flavonoides y fenoles, lo que lo hace útil en medicina tradicional para infecciones, aunque se necesita más investigación para su aplicación clínica formal. El interés farmacológico de *P. amboinicus* se debe a que contiene diversos compuestos químicos, que poseen propiedades medicinales para diversas enfermedades; por ejemplo, se les atribuyen a sus propiedades antimicrobianas, entre otras tiene actividad contra bacterias Gram negativas como *E. coli*, *Salmonella sp* y *Pseudomonas sp.*, así como contra Gram positivas como *Listeria sp* (Cardona y Díaz, 2022). El aceite esencial de hojas de *P. amboinicus* mediante difusión en gel de agar tiene más actividad antimicrobiana sobre bacterias gram positivas (*Staphylococcus aureus*) que sobre bacterias gram negativas (*Escherichia coli*) (Punet y Kumar, 2020). Dichos aceites esenciales de *P. amboinicus* tienen una fuerte actividad antimicrobiana contra varias

especies como *S. aureus*, *S. epidermidis*, *Enterococcus faecalis*, *Aeromonas caviae*, *Proteus vulgaris*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* *Salmonella sp.*, *Aspergillus niger*, *Candida albicans*, mostrando halos que van desde 17 a 42 mm con un perfil dependiente de la concentración (dos Santos Silva et al., 2020). La actividad antimicrobiana de *P. amboinicus* ha sido evaluada en diversos estudios, principalmente a través del análisis de sus extractos acuosos, orgánicos y aceites esenciales. Aunque la bibliografía sigue siendo limitada, los resultados disponibles destacan el potencial de esta planta frente a microorganismos patógenos y oportunistas. Los resultados concuerdan con lo descrito por de Castro Borba et al. (2021) indicaron una revisión bibliográfica integradora de 22 artículos científicos reportados con actividades antimicrobianas de la especie *P. amboinicus* en los extractos hidroalcohólicos, etanólicos y aceite esencial (AE).

Estos estudios confirmaron su actividad contra bacterias gram negativas, así como contra bacterias gram positivas. Finalmente, la actividad antibacteriana de los diferentes extractos de *P. amboinicus* se evaluó mediante el método de dilución en agar contra cuatro patógenos transmitidos por alimentos en términos de concentración inhibitoria mínima (CIM en ppm); en *B. cereus* fue la especie más sensible y mostró el valor de CIM más bajo, seguido de *S. aureus*, *E. coli*, *Y. enterocolitica* (Bhatt y Negi, 2012).

Tabla 4. Actividad antimicrobiana del aceite esencial, extractos orgánicos y acuoso de *Plectranthus amboinicus*

Cepa bacteriana	Metodología	Referencia
<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella sp.</i> , <i>Listeria sp</i> y <i>Pseudomona aeruginosa</i>	Prueba de difusión en disco en Agar Mueller Hinton, como se detalla en el método de Kirby-Bauer.	(Cardona y Díaz, 2022)
(+) (<i>Staphylococcus aureus</i>) than on negative Gram (-) (<i>Escherichia coli</i>)	Difusión en disco en Agar Mueller Hinton, mínima concentración imh inhibitoria (MIC).	(Hassani et al., 2012) (Punet y Kumar, 2020)
<i>Klebsiella pneumoniae</i> , <i>Mycobacterium tuberculosis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , y	Método difusión en disco en Agar Mueller Hinton, mínima concentración imh inhibitoria (MIC),	(dos Santos Silva et al., 2020)

Candida species

concentración
bactericida (MBC).

minima

Staphylococcus aureus, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica*

Método difusión en disco en Agar Mueller Hinton, concentración mínima inhibitoria del extracto acetona (MIC).

(Bhatt y Negi, 2012)

Gram negativas Escherichia coli (ATCC 25922, ATCC 35218), *Gram positivas Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *S. aureus* ATCC 27853)

Método de difusión en disco extracto etanólico.

(Freitas et al., 2014)

Salazar et al. (2018) evaluó la eficiencia de extractos naturales secos de té verde, orégano orejón (*P. amboinicus*) comercial al 100 % seco y fresco al 100 %, sobre la inhibición in vitro de una cepa de *E. coli* sembrados en placa Petri con agar nutritivo por intención en superficie. Los efectos de los tratamientos sobre el crecimiento de *E. coli* a las 48 y 72 h de incubación se presentan en los Cuadros 4, 5 y 6. Se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre la inhibición promedio de los extractos de té verde y orégano orejón seco a las 48 h respecto a la de las 72 h, resultando mayor el poder inhibidor promedio de estos extractos a las 72 h; no ocurre así con el extracto fresco de orégano orejón, donde no se encontró diferencia estadísticamente significativa ($p > 0,05$) entre la inhibición promedio de este extracto a las 48 y 72 h. Sin embargo, Guimarães et al. (2010) describieron que el carvacrol, uno de los principales componentes del aceite esencial de *P. amboinicus*, es responsable de diversas actividades biológicas, incluyendo efectos antimicrobianos. Este compuesto actúa interfiriendo con la integridad de la membrana celular de los microorganismos.

Posteriormente, Carballo (2012) evaluó extractos hidroalcohólicos de *P. amboinicus* (orégano francés) y *Ocimum sanctum* (albahaca morada) frente a *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis*, *Saccharomyces cerevisiae* y *Aspergillus oryzae*. Los resultados indicaron que los extractos inhibieron el crecimiento de *E. coli*, *S. aureus* y *S. cerevisiae*, aunque no fueron efectivos contra *B. subtilis* ni contra *A. oryzae*. Seguido, Erny Sabrina et al. (2014) estudiaron la actividad del aceite esencial frente a bacterias y hongos

patógenos. Encontraron que *E. coli* fue el microorganismo más sensible, seguido por *S. aureus*, mientras que *Candida albicans* y *Candida tropicalis* mostraron zonas de inhibición similares a las obtenidas con la antifúngica nistatina. Estos resultados refuerzan la eficacia del aceite esencial como agente antimicrobiano de amplio espectro. En el mismo año, Shubha y Bhatt (2015) exploraron el efecto del extracto acuoso caliente de las hojas de *P. amboinicus* sobre el probiótico *Lactobacillus plantarum*. A través de técnicas de microdilución en caldo y recuento en placa, observaron un efecto estimulante sobre el crecimiento de este probiótico, además de una inhibición significativa (entre 45 % y 60 %) frente a microorganismos gram positivos y negativos, incluyendo cepas resistentes como *S. aureus* meticilina-resistente, *E. coli* y *Salmonella typhimurium*. Estos hallazgos sugieren además una posible acción prebiótica por parte de los fitoconstituyentes presentes en la planta. En un enfoque aplicado, Salazar et al. (2018) analizaron el efecto del aceite esencial de las hojas de *P. amboinicus* sobre una cepa de *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus enteritidis*, *E. coli*, *S. aureus* y *E. faecalis* a las 48 y 72 horas de incubación, se observó que todas las cepas bacterianas fueron sensibles, con zonas de inhibición grandes y definidas. Poco después, dos Santos Silva et al. (2020) demostraron que los compuestos carvacrol y timol presentes en el aceite esencial de *P. amboinicus* suprimen las actividades enzimáticas de la coagulasa y la lipasa en *S. aureus*, lo que inhibe la producción de enterotoxinas estafilocócicas, contribuyendo así a la neutralización de su patogenicidad. En el mismo año, de Castro Borba et al. (2021) evaluaron la actividad antimicrobiana del aceite esencial de plantas cultivadas con diferentes fertilizantes orgánicos, empleando la técnica de microdilución en caldo frente a *E. coli* y *C. albicans*. El mejor rendimiento del aceite fue de 1,65 %, y su composición química incluyó carvacrol (58,6 %) como principal componente, seguido de γ -terpineno (15,1 %) y *p*-cimeno (8,2 %).

Adicionalmente, investigaciones internacionales aportan más evidencia sobre el papel del carvacrol y el timol en la actividad antimicrobiana. Por ejemplo, Başer (2008) describe cómo estos compuestos aumentan la permeabilidad de la membrana citoplasmática en bacterias gram negativas, provocando la fuga de ATP e inhibiendo enzimas como la ATPasa. En la

misma línea, Swamy et al. (2017) señalaron una mayor susceptibilidad in vitro de bacterias gram negativas a extractos de *P. amboinicus*, lo cual explicaron por diferencias en la estructura de la pared celular y la membrana externa. Esta susceptibilidad también estaría relacionada con la actividad antioxidante de los compuestos presentes en la planta. Los hallazgos más relevantes encontrados en esta revisión muestran las estructuras vegetales, los compuestos químicos importantes en el aceite esencial, extracto orgánico, extracto acuoso con actividad antimicrobiana y capacidad bactericida referentes a los usos medicinales y culinarios de la especie *P. amboinicus*.

Conclusión

El uso de métodos instrumentales en el análisis de *P. amboinicus* permite una caracterización precisa de sus compuestos químicos, aportando información confiable y validada a la biblioteca de referencia como la NIST sobre las moléculas químicas. Esto fortalece la calidad de los estudios tanto en el ámbito científico como en el industrial, al garantizar una identificación estructural más exacta de las moléculas involucradas.

Es el caso de la determinación estructural de los polifenoles presentes en los extractos vegetales acuoso y orgánico; aceite esencial de *P. amboinicus* evidencia una significativa actividad biológica, demostrando su capacidad para inhibir el crecimiento de diversos microorganismos. Esta acción, ya sea bacteriostática o bactericida, resalta el potencial de esta planta como fuente natural de compuestos antimicrobianos útiles en aplicaciones culinarias, terapéuticas o farmacológicas.

Con estos resultados de antecedentes de evidencias que avalan a los aceites esenciales y a los extractos señalados, se deja claro que son una buena fuente natural y disponible de fitoquímicos, para facilitar el desarrollo de diferentes preparaciones farmacéuticas con actividad biológica definida. En el contexto de su uso antimicrobiano, el objetivo de la presente investigación bibliográfica fue investigar los compuestos químicos o fitoconstituyentes presentes en el aceite esencial, en los extractos orgánicos y acuosos de las hojas verdes de la especie vegetal *P. amboinicus* analizados mediante técnicas

instrumentales y dichas actividades biológicas, especialmente los polifenoles, que podrían inhibir el crecimiento de patógenos de gran importancia en la salud pública.

Agradecimientos

Agradecemos, al Programa de Maestría en Ciencias Químicas con Énfasis en Inocuidad Alimentaria (MCQIA) de la Universidad Autónoma de Chiriquí (UNACHI), así como a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), por los financiamientos recibidos.

Referencias

- Ahamed, A. N., Yaser, S. M., Idhris, S. M., Padusha, M. S. A., y Sherif, N. A. (2023). Phytochemical and pharmacological potential of the genus *Plectranthus*—A review. *South African Journal of Botany*, 154, 159-189. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.01.026>
- Almenares-Rosales, J. E., Pérez-Quintero, Y., Ramos-Frómeta, C., Fung-Boix, Y., y Arias-Cedeño, Q. (2024). Composición fitoquímica y actividad antioxidante de extractos de *Plectranthus amboinicus* cultivado con agua tratada magnéticamente. *Revista Cubana de Química*, 36(2).
- Annadurai Senthilkumar, A. S., y Venugopalan Venkatesalu, V. V. (2010). Chemical composition and larvicidal activity of the essential oil of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng against *Anopheles stephensi*: a malarial vector mosquito. <https://doi.org/10.1007/s00436-010-1996-6>
- Arumugam G, Swamy MK, y Sinniah UR. (2016). *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng: Botanical, Phytochemical, Pharmacological and Nutritional Significance. *Molecules*. 2016 Mar 30;21(4):369. <https://doi.org/10.3390/molecules21040369>
- Asiimwe, S., Borg-Karlsson, A. K., Azeem, M., Mugisha, K. M., Namutebi, A., y Gakunga, N. J. (2014). Chemical composition and toxicological evaluation of the aqueous leaf extracts of *Plectranthus amboinicus* Lour. Spreng. *Int J Pharm Sci Invent*, 3(2), 19-27.
- Bañuelos-Hernández, A. E., Azadniya, E., Ramírez, M. E., and Morlock, G. E. (2020). Bioprofiling of mexican *Plectranthus amboinicus* (Lour.) essential oil via planar chromatography-effect-directed analysis combined with direct analysis in real time highresolution mass spectrometry. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*. 43(9-10):344-350. <https://doi.org/10.1080/10826076.2020.1737542>
- Bhatt, P., y Negi, P. S. (2012). Antioxidant and antibacterial activities in the leaf extracts of Indian borage (*Plectranthus amboinicus*). *Food and Nutrition Sciences*, 3(2), 146-152.
- Barbosa, M. D. O., Wilairatana, P., Leite, G. M. D. L., Delmondes, G. D. A., Silva, L. Y. S. D., Júnior, S. C. A., ... y Kerntopf Mendonça, M. R. (2023). *Plectranthus* species with anti-inflammatory and analgesic potential: A systematic review on ethnobotanical and pharmacological findings. *Molecules*, 28(15), 5653. <https://doi.org/10.3390/molecules28155653>

- Carballo, I. (2012). Actividad antimicrobiana de extractos hidroalcohólicos de orégano francés (*Plectranthus amboinicus*) y albahaca morada (*Ocimum sanctum*). Trabajo de grado, Universidad de la Habana. 58 p.
- Cardona, L. F. V., & Díaz, J. C. Q. (2022). Extracción y caracterización de aceite esencial de orégano, especie *Plectranthus amboinicus*, a partir de cultivos orgánicos del Magdalena Medio en Colombia. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 550-563. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-043>
- Castro, N. P. P., Méndez, G. L., Fortich, M. D. R. O., Alarcón, M. E. T., & Milano, Y. G. (2016). Evaluación de indicadores físicos y químicos de una emulsión con aceite esencial de *Plectranthus amboinicus* L. *Revista Cubana de Farmacia*, 50(3).
- da Costa, J. G., Pereira, C. K., Rodrigues, F. F., y de Lima, S. G. 2010. Chemical Composition, Antibacterial and Fungicidal Activities of Leaf Oil of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng. *Journal of Essential Oil Research*. 22: 183-185. <https://doi.org/10.1080/10412905.2010.9700298>.
- de Castro Borba, E. R., dos Santos Ferreira, H., Mubárack, T. C., Luz, T. R. S. A., Silveira, D. P. B., Silva, A. Z., ... y Coutinho, D. F. (2021). Technological prospection of the biological activities of *Plectranthus amboinicus* (Loureiro) Sprengel: an integrative review. *Research, Society and Development*, 10(5), e30110514653-e30110514653. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14653>
- de Medeiros Gomes, J., et al., Seasonal Variations of Polyphenols Content, Sun Protection Factor and Antioxidant Activity of Two *Lamiaceae* Species. *Pharmaceutics*, 2021. 13(1). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13010110>
- dos Santos Silva, J. M., da Silva Almeida, J. R. G., Alves, C. D. S. C., Nery, D. A., Damasceno, L. M. O., de Souza Araújo, C., ... y de Oliveira, A. P. (2020). Antimicrobial Activity from Species *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng, a Review. *European J Med Plants*, 31(18), 1-14. <https://doi.org/10.9734/EJMP/2020/v31i1830337>
- Erny Sabrina, M. N., Razali, M., Mirfat, A. H. S., & Mohd Shukri, M. A. (2014). Antimicrobial activity and bioactive evaluation of *Plectranthus amboinicus* essential oil. *American Journal of Research Communication*, 2(12), 121-127.
- Freitas, R. C., Azevedo, R. R. S., Souza, L. I. O., Rocha, T. J. M., y dos Santos, A. F. (2014). Avaliação da atividade antimicrobiana e antioxidante das espécies *Plectranthus amboinicus* (Lour.) e *Mentha x villosa* (Huds.). *Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada*, 35(1).
- Guimarães, A. G., Oliveira, G. F., Melo, M. S., Cavalcanti, S. C., Antonioli, A. R., Bonjardim, L. R., & Quintans-Júnior, L. J. (2010). Bioassay-guided evaluation of antioxidant and antinociceptive activities of carvacrol. *Basic & clinical pharmacology & toxicology*, 107(6), 949-957. <https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2010.00609.x>
- El-hawary, S. S., El-sofany, R. H., Abdel-Monem, A. R., y Ashour, R. S. (2012). Phytochemical screening, DNA fingerprinting, and nutritional value of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng. *Pharmacognosy Journal*, 4(30), 10-13. <https://doi.org/10.5530/pj.2012.30.2>
- López-Martínez, S., Chan-Jiménez, J. E., Hernández-López, E. S., y Rodríguez-Luna, A. R.

- (2023). Oreganón, perejil, cilantro, hierbabuena y albahaca a través de difracción de rayos x. *Biotecnia*, 25(3), 113-124. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.1862>
- Hassani, M. S., Zainati, I., Zrira, S., Mahdi, S., y Oukessou, M. (2012). Chemical composition and antimicrobial activity of *Plectranthus amboinicus* (Lour) Spreng. essential oil from archipelago of Comoros. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 15(4), 637-644. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2012.10644098>
- Jaramillo-Colorado, B. E., Vega-Díaz, R., y Pino-Benítez, C. N. (2022). Volatile chemical composition of Colombian *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng essential oil and its biocidal action against *Tribolium castaneum* (Herbst). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 16(1), e13413. <https://doi.org/10.17584/rcch.2022v16i1.13413>
- López-Martínez, S., Chan-Jiménez, J. E., Hernández-López, E. S., y Rodríguez-Luna, A. R. (2023). Oreganón, perejil, cilantro, hierbabuena y albahaca a través de difracción de rayos x. *Biotecnia*, 25(3), 113-124. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.1862>
- Lukhoba, C.W., M.S.J. Simmonds, and A.J. Paton. 2006. *Plectranthus*: A review of ethnobotanical. *J Ethnopharmacol* 103(1): p. 1-24 <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.09.011>
- Malpica-Acosta, S. B., Acosta-Osorio, A. A., Benedito-Fort, J. J., y Castillo-Zamudio, R. I. (2024). Efecto de tres métodos de extracción en el rendimiento, actividad antioxidante, fenoles totales y estabilidad de extractos de hojas de *Plectranthus amboinicus*. *CienciaUAT*, 18(2), 91-106. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v18i2.1797>
- Morales-Zamora, M., y Villanueva-Ramos, G. (2021). Obtención de extracto fluido de *Plectranthus amboinicus* (orégano), utilizando el método de agitación mecánica. *Afinidad*, 78(592).
- Nguyen, N. Q., Minh, L. V., Trieu, L. H., Bui, L. M., Lam, T. D., Hieu, V. Q., ... Trung, L. N. Y. (2020). Evaluation of total polyphenol content, total flavonoid content, and antioxidant activity of *Plectranthus amboinicus* leaves. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 736, No. 6, p. 062017). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/6/062017>
- Orsini, G. (2020). *Coleus* y *Plectranthus* (Lamiaceae) en Venezuela: actualización nomenclatural y usos tradicionales. *Revista de la Facultad de Farmacia*, 83(1 y 2), 123-137.
- Patel, R., Mahobia, N., Waseem, N., Upwar, N., y Singh, S. 2010. Phyto-physicochemical investigation of leaves of *Plectranthus amboinicus* (Lour) Spreng. *Pharmacognosy Journal*. 2: 536-542. [https://doi.org/10.1016/s0975-3575\(10\)80057-4](https://doi.org/10.1016/s0975-3575(10)80057-4)
- Pereira, A. P. M., Martins, T. G. T., Arruda, M. O., Dias, A. A. S., da Silva Souto, L. A., de Araújo Neto, A. P., ... y Everton, G. O. (2021). Chemical profile and larvicidal activity of essential oil obtained from the leaves of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng. *Research, Society and Development*, 10(4), e15410413846-e15410413846. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13846>
- Phattayanon, N., Assawamakin, A., Dechwongya, P., y Dadookel, A. (2024). From Tradition to Therapy: *Plectranthus amboinicus* as a Remedy for Respiratory Inflammation. *Interprofessional Journal of Health Sciences*, 22(2).

- Pinheiro, P. F., Costa, A. V., Alves, T. D. A., Galter, I. N., Pinheiro, C. A., Pereira, A. F., ... y Fontes, M. M. P. 2015. Phytotoxicity and cytotoxicity of essential oil from leaves of *Plectranthus amboinicus*, carvacrol, and thymol in plant bioassays. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 63: 8981-8990. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03049>.
- Pupo-Blanco, Y. G., Burgueño-Tapia, E., de Mendonca, D. I. M. D., y Vargas-Batis, B. (2024). Identificación de compuestos con acción antifúngica en extractos de hojas de *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng. Revista Cubana de Química, 36(1), 10-21.
- Punet Kumar, S., y Kumar, N. (2020). *Plectranthus amboinicus*: A review on its pharmacological and pharmacognostical studies. American Journal of Physiology, 10(2), 55-62. <https://doi.org/10.5455/ajpbp.20190928091007>
- Salazar, C., Chavarri, M., Zárraga, H., Martínez, S., y Quintero, M. A. (2018). Efectividad de extractos naturales de té verde [*Camelia sinensis* (L.) Kuntze] y orégano orejón [*Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng.] sobre la inhibición in vitro de *Escherichia coli*. Revista de la Facultad de Agronomía, 44(3), 89-95.
- Senthilkumar, A., y Venkatesalu, V. (2010). Chemical composition and larvicidal activity of the essential oil of *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng against *Anopheles stephensi*: a malarial vector mosquito. Parasitology research, 107(5), 1275-1278. <https://doi.org/10.1007/s00436-010-1996-6>
- Shubha, J. R., y Bhatt, P. 2015. *Plectranthus amboinicus* leaves stimulate growth of probiotic *L. plantarum*: Evidence for ethnobotanical use in diarrhea. Journal of Ethnopharmacology. 166: 220-227. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2015.02.055>
- Swamy, M. K., Arumugam, G., Kaur, R., Ghasemzadeh, A., Yusoff, M. M., y Sinniah, U. R. (2017). GC-MS based metabolite profiling, antioxidant and antimicrobial properties of different solvent extracts of Malaysian *Plectranthus amboinicus* leaves. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1517683>
- Vega, D. C., Ruiz, L. P., y Ayala, D. G. (2024). Comparación de dos métodos de extracción para el análisis fitoquímico de extractos alcohólicos de hojas de *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng. Ciencia e Ingeniería: Revista de investigación interdisciplinar en biodiversidad y desarrollo sostenible, ciencia, tecnología e innovación y procesos productivos industriales, 11(1), 2. <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.12549588>