

BIOPRODUCTOS

a partir de
residuos
agroindustriales



Coordinadores:
Guadalupe Bustos Vázquez
Daniel Trujillo Ramírez

Bioproductos a partir de residuos agroindustriales

Bioproductos a partir de residuos agroindustriales /Guadalupe Bustos Vázquez, Daniel Trujillo
Ramírez coordinadores .—Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas ;
Ciudad de México : Editorial Fontamara , 2024.

206 págs. ; 17 x 23 cm.

Biotecnología

LC: S494.5.B563 B8.7 2024

DEWEY: 660.6 TCB

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2024

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Segundo Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2905 • www.uat.edu.mx
cpublicaciones@uat.edu.mx

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-8888-36-8

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-607-736-889-2

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea
cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.
Libro digital

**Esta obra y sus capítulos fueron sometidos a una revisión de pares a doble ciego, la cual
fue realizada por especialistas pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadoras
e Investigadores. Así mismo, fueron aprobados para su publicación por el Consejo de
Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas y el Comité Interno de la
editorial Fontamara.**

Bioproductos a partir de residuos agroindustriales

Coordinadores:

Guadalupe Bustos Vázquez

Daniel Trujillo Ramírez

editorial
fontamara





MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado
PRESIDENTE

Dr. Fernando Leal Ríos
VICEPRESIDENTE

Dr. Arturo Mora Olivo
SECRETARIO TÉCNICO

Mtro. Eduardo García Fuentes
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

MVZ Rogelio de Jesús Ramírez Flores
VOCAL

Comité Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodrigues** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marciano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urrea** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

Índice

Capítulo 1

Aprovechamiento integral del noni (*Morinda citrifolia*) 13

Josué Abisai Palacios Torres, Ricardo Guadalupe Escamilla Gallegos y Juan Francisco Castañón Rodríguez

Capítulo 2

Valorización de proteínas vegetales de fuentes no convencionales 39

Alejandro Martínez Velasco, César Alberto Roldán Cruz y Daniel Trujillo Ramírez

Capítulo 3

Probióticos y prebióticos: usos y aplicaciones 57

Alfredo del Ángel del Ángel, Verónica Hernández Robledo y Sebastián Contreras Castillo

Capítulo 4

Endospermo del mango (*Mangifera indica*): fuente potencial para la obtención de almidón 69

Guadalupe Bustos Vázquez, Daniel Trujillo Ramírez y Luz Andrea Castro Mendoza

Capítulo 5

Quitina y quitosano obtenidos de subproductos agroindustriales: características, aplicaciones y tendencias 89

Neith Pacheco, Teresa Ayora Talavera y Juan Carlos Cuevas Bernardino

Capítulo 6

Metodología para la identificación de biosurfactantes y gramicidina en corrientes residuales alimentarias 103

Xanel Vecino Bello, Ana Belén Moldes Menduiña y José Manuel Cruz Freire

Capítulo 7

Frutos de cactáceas como fuentes alternativas para la extracción de compuestos biofuncionales: betalainas 121

Clara Cervantes Arista, Daniel Trujillo Ramírez y Rosa Elena Salazar López

Capítulo 8

Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench): un alimento nutritivo alternativo ante los cambios climáticos en tiempos actuales 143

Damara A. Guillén Ibarra, Octelina Castillo Ruiz y Sanjuana E. Alemán Castillo

Capítulo 9

Producción de micoplaguicidas a partir de residuos agroindustriales 159

Reyna Ivonne Torres Acosta, Rodolfo Torres de los Santos y José Reyes Hernández

Capítulo 10

Producción de biosurfactantes microbianos a partir de subproductos agrícolas 173

María Alejandra Pichardo Sánchez, Tulissa Monserrat Gutiérrez Olvera, Nadia Adelina Rodríguez Durán y Luis Víctor Rodríguez Durán

Capítulo 11

Reducción de cafeína en ensilados de pulpa/cáscara de café para la alimentación de rumiantes 193

Victor Jesús Albores Flores, José Alfonso López García, Julieta Grajales Conesa y Hermilo Lucio Castillo

Tablas y figuras

Capítulo 1

Figura 1. Frutos maduros del noni	16
Figura 2. Árbol de noni de un año	19
Figura 3. Cultivo de árboles de noni en Gómez Farías	20
Tabla 1. Taxonomía de <i>Morinda citrifolia</i>	16
Tabla 2. Características del fruto	17
Tabla 3. Manejo de riego desde la siembra	18
Tabla 4. Rendimiento aproximado de un árbol de noni en el norte de la India	19
Tabla 5. Comparación de la composición nutricional del noni	22
Tabla 6. Componentes bioactivos de la <i>Morinda citrifolia</i> Linn identificados por varios autores	24

Capítulo 2

Figura 1. a) fruto de yaca (b) granos de haba (c) huauzontle y (d) amaranto	42
Tabla 1. Propiedades funcionales de la proteína de haba (<i>Vicia faba</i> L)	43
Tabla 2. Propiedades funcionales de la proteína de amaranto (<i>Amaranthus</i> spp.)	44
Tabla 3. Propiedades funcionales de la proteína de yaca (<i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam.)	46

Capítulo 3

Figura 1. Esquema de proceso de obtención de los probióticos	60
Tabla 1. Fuentes de probióticos, función y/o aplicación	60
Tabla 2. Probióticos utilizados en la industria alimentaria	61
Tabla 3. Efecto de prebióticos naturales como ingrediente funcional sobre las propiedades y características sensoriales de algunos alimentos	63

Capítulo 4

Figura 1. Estructura de la amilosa y amilopectina como constituyentes de la molécula de almidón	72
Figura 2. Gránulos de almidón de litchi (<i>Litchi chinensis</i>)	74
Figura 3. Composición porcentual de los subproductos presentes en el mango (<i>Mangifera indica</i>)	77
Figura 4. Microscopía electrónica de barrido del almidón de endospermo de mango a) 100×, b) 300×, c) 1000× y d) 2000×	79
Tabla 1. Contenido de amilosa de algunas fuentes de almidones convencionales y no convencionales	73

Capítulo 5

Tabla 1. Principales fuentes naturales de quitina y quitosano en la naturaleza	92
Tabla 2. Principales técnicas analíticas empleadas en la caracterización de quitina y quitosano	95

Capítulo 6

Figura 1. A) Tensiómetro manual; b) Tensiómetro automático	105
Figura 2. Proceso general para la extracción de biosurfactantes lipopéptidos a partir de corrientes residuales, mediante extracción líquido-líquido con recuperación del disolvente	109
Figura 3. Proceso general para la extracción de biosurfactantes lipopéptidos a partir de corrientes residuales, mediante precipitación con HCl y posterior purificación con extracción líquido-líquido con recuperación del disolvente	109
Figura 4. Proceso general para la extracción de biosurfactantes a partir de corrientes residuales, mediante extracción líquido-sólido con matrices sólidas	111
Figura 5. Proceso general para la extracción de biosurfactantes no extracelulares a partir de corrientes residuales	112
Tabla 1. Pérdida de masa observada tras la pérdida de aminoácidos durante la fragmentación de moléculas complejas y su nomenclatura	113

Capítulo 7

Figura 1. a) Estructura del ácido betalámico, b) estructura de las betaxantinas y c) estructura de las betacianinas	124
Figura 2. Espectro de absorción de las betacianinas (región azul) y betaxantinas (región verde)	125
Figura 3. Ruta de síntesis de betalainas y betaxantinas	126
Figura 4. Fuentes de betalainas	130
Figura 5. <i>Stenocereus stellatus</i> , A) Planta, B y C) Flores, D y E) Frutos maduros, F) Pulpa	131
Figura 6. <i>Stenocereus</i> spp., A) Planta, B) Flor, C) Corte longitudinal de la flor, D) y E) Frutos maduros, F) Pulpa	132
Figura 7. <i>Opuntia</i> spp., A) Planta con frutos maduros, B) Corte longitudinal de la flor,	

C) Corte transversal de los frutos, D) Pulpa	132
Figura 8. <i>Opuntia</i> spp. A) Planta, B) Flor con fruto, C) corte longitudinal de la flor con fruto	133
Tabla 1. Betalaínas totales en frutos del género <i>Stenocereus</i> spp. y <i>Hylocereus</i> spp.	134
Tabla 2. Betalaínas totales en frutos del género <i>Opuntia</i>	135
Capítulo 8	
Figura 1. Estructura del sorgo	147
Figura 2. Utilización diaria del agua por la planta del sorgo	147
Figura 3. Principales productores de sorgo en el mundo en el ciclo 2010-2011	152
Figura 4. Principales estados productores de sorgo en México en 2009	153
Tabla 1. Composición de aminoácidos esenciales del grano de sorgo (miligramos por gramo de sorgo)	149
Tabla 2. Ácidos grasos contenidos en el grano de sorgo	150
Tabla 3. Composición de vitaminas y minerales del sorgo	150
Capítulo 9	
Figura 1. Apariencia de <i>Metarhizium anisopliae</i> cultivada in vitro en medio PDA solidificado mostrando una esporulación verde	163
Figura 2. Apariencia de <i>Beauveria bassiana</i> cultivada in vitro en medio PDA solidificado mostrando una esporulación blanca	163
Figura 3. Apariencia de <i>Isaria fumosorosea</i> cultivada in vitro en medio sólido mostrando una esporulación rosa tenue	163
Figura 4. Apariencia de <i>Paecilomyces lilacinus</i> cultivada in vitro en medio PDA solidificado mostrando una esporulación rosa	163
Figura 5. Apariencia de <i>Trichoderma harzianum</i> cultivada in vitro en medio sólido mostrando una esporulación verde	163
Tabla 1. Residuos agroindustriales usados en la producción de hongos	165
Capítulo 10	
Tabla 1. Clasificación de los biosurfactantes	175
Figura 1. Estructura básica de las cuatro principales clases de glicolípidos biosurfactantes	176
Tabla 2. Ejemplos de biosurfactantes producidos a partir de subproductos agroindustriales	181
Capítulo 11	
Figura 1. Dinámica de los cambios de pH en el proceso de ensilaje	198
Figura 2. Dinámica de producción de carbohidratos solubles en el proceso de ensilaje	199
Figura 3. Dinámica de producción de ácido láctico en el proceso de ensilaje	200
Figura 4. Dinámica de reducción en la concentración de cafeína durante el proceso de ensilaje	202

Presentación

La actividad agroindustrial es de gran importancia para la economía de un país por sus repercusiones en el sector agropecuario y en la industria. El desarrollo y fortalecimiento de las empresas agroindustriales depende de factores legales, administrativos, de mercado, técnicos, financieros y del soporte que el Estado y el sector privado puedan proveer en la generación de materia prima que satisfaga los requisitos de cantidad y calidad.

El uso de los residuos agroindustriales representa una alternativa para la obtención de nuevos productos con alto valor agregado. Estos residuos provenientes de procesos industriales -alimentarios o agrícolas- generalmente no son de gran interés ni utilidad para el empresario o productor, lo que ocasiona diversos problemas medioambientales. Sin embargo, los residuos pueden ser materia prima con gran potencial para desarrollar productos biotecnológicos. La obtención de estos compuestos revalorizaría así una fracción de desecho y originaría compuestos útiles en el campo alimentario, médico o en el sector químico.

La biotecnología utiliza microorganismos para la bioconversión de estos residuos en productos de interés comercial, es decir, con mayor valor añadido (enzimas, proteína unicelular, pigmentos, antibióticos, etcétera). La utilización de subproductos agroindustriales incide en la preservación de la calidad del medio ambiente y es parte del desarrollo tecnológico orientado a la transformación sustentable de los recursos naturales.

Guadalupe Bustos Vázquez

Capítulo 1

Aprovechamiento integral del noni (*Morinda citrifolia*) *Integral utilization of noni (*Morinda citrifolia*)*

Josué Abisai Palacios Torres

Ricardo Guadalupe Escamilla Gallegos

**Juan Francisco Castañón Rodríguez¹*

Resumen

Morinda citrifolia Linn o comúnmente llamado “noni” es un fruto de origen asiático y australiano, considerado un alimento funcional por sus propiedades benéficas. En Tamaulipas, México, se ha empezado a cultivar el noni; sin embargo, tiene una escasa comercialización debido a sus características sensoriales, por lo que se busca esparcir y así aprovechar sus funciones de manera integral -no solo como alimento- al darle un valor agregado a sus subproductos como la cáscara y las semillas y emplearlo en la industria cosmética, farmacéutica y de biocombustibles. El objetivo de este capítulo es analizar el aprovechamiento integral del noni y sus compuestos -con efectos benéficos- que pueden ser la base para la formulación de diversos productos; para ello, primero se mencionan las características botánicas del fruto, sus propiedades fisicoquímicas, composición nutricional y los compuestos bioactivos más relevantes, posteriormente se describen los efectos benéficos de los principales componentes, y finalmente se muestran los usos y posibles aplicaciones del noni. Gracias a los fenoles, alcaloides y antraquinonas, el noni muestra propiedades benéficas en el organismo, y no se ha demostrado que produzca una dosis tóxica, por lo cual, es seguro su consumo. La aplicación de tecnologías alimentarias muestra un gran avance año tras año en el desarrollo de productos alimenticios y no alimenticios, con el fin de aprovechar las propiedades nutricionales del noni. No obstante, es necesario seguir ofreciendo alternativas para que su aprovechamiento integral contribuya a la economía de micro productores en Tamaulipas. Se pretende mostrar a los productores de noni información actualizada sobre los múltiples beneficios que aporta este fruto, además de posibles opciones para el desarrollo de

¹ Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica de Trabajo Social y Ciencias para el Desarrollo Humano. Centro Universitario. Ciudad Victoria, C.P. 87149

*Autor de correspondencia: jfcastanon@docentes.uat.edu.mx

bioproductos innovadores y de un alto grado de aceptabilidad utilizando tanto la pulpa como los subproductos que se generan en su procesamiento.

Palabras clave: noni, alimento funcional, compuestos bioactivos, bioproductos, subproductos, Tamaulipas.

Summary

The *Morinda citrifolia* Linn, or commonly known as “noni” is a fruit of Asian and Australian origin, which is considered a functional food due to its powerful beneficial properties. Currently, in Tamaulipas, Mexico, noni has begun to be cultivated; however, it has little commercialization, probably attributed to its sensory characteristics, which is why it seeks to spread and thus take full advantage of its functions, not only the use as food, but also giving added value to its by-products such as the peel and seeds and their use for other purposes such as the cosmetic, pharmaceutical and biofuel industries, therefore the objective of this chapter consists in showing the full use of noni and its compounds that beneficial effects are attributed that can be the basis for the formulation of some products. For this, the botanical characteristics of the fruit, its physicochemical properties, nutritional composition, and the most relevant bioactive compounds are mentioned first, then the beneficial effects of the main components are described, and finally the uses and possible applications of noni are shown. Thanks to phenols, alkaloids, and anthraquinones, noni shows extensive beneficial properties in the body, on the other hand, a toxic dose has not been demonstrated, for which its consumption is safe. The application of food technologies shows a great advance every year in the development of food and non-food products, to take advantage of the nutritional properties of noni. However, it is necessary to continue offering alternatives for its integral use and to contribute to the local economy of small producers in Tamaulipas. With this information, it is intended to show noni producers updated information that shows the multiple benefits that this fruit provides, as well as possible options and alternatives for the development of innovative bioproducts and a high degree of acceptability using both the pulp and the by-products that are generated in its processing.

Keywords: noni, functional food, bioactive compounds, bioproducts, byproducts, Tamaulipas.

Introducción

La *Morinda citrifolia* Linn o mejor conocido como “noni” pertenece a la familia Rubiaceae, es un árbol de corta estatura cuyo origen es del sureste de Asia y Australia, sin embargo, se ha distribuido alrededor del mundo, debido a sus tolerancias climáticas y su facilidad de expandirse. Posee propiedades medicinales -gracias a los fitoquímicos- tales como efectos antibacterianos, antivirales, antifúngicos, antitumorales, antihelmínticos, analgésicos, hipotensos, antiinflamatorios, antisépticos y beneficios en el sistema inmunológico (Abou et al., 2017). La búsqueda de alternativas de ciertos productos podría beneficiar a poblaciones que sufren de enfermedades crónicas no transmisibles, que en México son algunas de las principales causas de muerte (Barba, 2018).

Desde hace 2000 años las personas utilizaban esta fruta para fines medicinales. El primer registro es de 1848, por Thomas Anderson. Debido a su impacto curativo y uso medicinal, se ha extendido hacia varias partes del mundo, por lo que su mercado más grande se establece en Norte américa, Europa, Japón, México, Asia y Australia (Macpherson et al., 2007), sin embargo, existe un impedimento para facilitar su comercio, puesto que el fruto en su estado de madurez posee un olor fétido, que se describe como desagradable y penetrante, debido a que es muy rico en ácidos grasos (Garay et al., 2010).

Por esta razón, se busca analizar el aprovechamiento integral del noni y sus compuestos que producen efectos benéficos para ser utilizados en el desarrollo de productos. En el presente capítulo se muestran las características botánicas del fruto de noni, así como su importancia socioeconómica y comercialización, la composición química, las propiedades terapéuticas y nutritivas, usos y aplicaciones convencionales del fruto y sus subproductos, usos alternativos y las perspectivas y tendencias en el desarrollo de nuevos productos con el fin de dar opciones a los productores locales para su comercialización y apoyar la economía local.

Descripción general del noni

Taxonomía

Alrededor del mundo se han identificado 115 especies de noni (Peter y Peter, 2018); pertenece a la familia de la Rubiaceae, género *Morinda*, cuya taxonomía se muestra en la Tabla 1. A través de los años se han descubierto 3 variaciones de noni; que incluye la *Morinda citrifolia* var. *citrifolia*, *bracteata* y *potteri*, diferenciadas por las hojas y en el tamaño del fruto (Nelson, 2005), sin embargo, la que tiene mayor relevancia e impacto económico es la variación de *citrifolia* (Pawlus y Kinghorn, 2007).

Tabla 1*Taxonomía de Morinda citrifolia*

Clasificación taxonómica	Descriptor
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Rubiales
Familia	Rubiaceae
Género	Morinda
Especie	<i>Morinda citrifolia</i> Linn

Fuente: Sistema de Clasificación de Cronquist (1998).

Características morfológicas

La altura del pequeño árbol ronda entre los 3 a 10 m y por lo general, tiene muchas hojas ovoides de una longitud de 5 a 17 cm y una anchura de 10 a 40 cm, el fruto es ovoide con una textura de relieve, como se aprecia en la Figura 1, con longitud que varía de 3 a 10 cm y una anchura de 3 a 6 cm, en promedio por fruto.

Figura 1*Frutos maduros del noni*

En la Tabla 2 se detallan las características del noni, el cual se estima que tiene un peso promedio de 147.9 g y una longitud de 9.8 cm. Chan-Blanco et al. (2006) describieron el proceso de maduración: su aspecto comienza con un color verde oscuro cuando está inmaduro y su textura es dura, eventualmente, sigue con su etapa de maduración cambiando a un verde amarillento y su textura dura, hasta

entrar a un color amarillo pálido, en donde reducirá su dureza, terminando con un color gris translúcido y textura suave.

Tabla 2

Características del fruto

Característica	Valores
Peso de la fruta	147.9 g
Longitud de la fruta	9.8 cm
Circunferencia de la fruta	5.26 cm
Gravedad específica	1.13 g (peso/vol.)
Recuperación de jugo	38.95- 48.50 %
Porcentaje de pulpa	44.76- 46.72
Porcentaje de semillas	3.24- 4.31

Fuente: Rethinam y Sivaraman (2007).

El noni puede crecer en una gran variedad de suelos con facilidad de regenerarse en diferentes condiciones; esto quiere decir que solo es necesario un medio con suficiente agua para la germinación de la semilla (Nelson, 2005). Para la reducción de tiempo de la germinación de la semilla, es imprescindible escarificar; si no se hace, tardaría alrededor de 60 días o más en germinar, no obstante, si se escarifica, entre 3 a 4 semanas, con variaciones según las condiciones en las que se realiza el cultivo (Peter y Peter, 2018). Kumar (2020) refiere que de febrero a septiembre son las temporadas ideales para su cultivo, en donde se recomienda arar la tierra y que exista un distancia de 3 m x 3 m por planta, la cual empezará a fructificar después de 3 años. Ahora bien, es recomendable no excederse con el agua, aunque las condiciones de riego dependerán de la edad de la planta o árbol y de las condiciones climatológicas y edafológicas.

El clima tropical es de los más favorecedores para este tipo de planta (Krishnakumar et al., 2015). Los meses indispensables para la siembra son de junio a octubre y de enero a marzo. Los días antes de la siembra es necesario realizar un pequeño hoyo de alrededor de 60 cm de largo, ancho y profundidad y llenar con tierra vegetal y composta. La distancia recomendada entre plantas es de 4 m x 4 m con 700 plantas por hectárea (ha) (Peter y Peter, 2018); en cambio, Gupta (2020) refiere que de febrero a septiembre son las temporadas ideales para su cultivo, en

donde se recomienda arar la tierra y que exista un distancia de 3 m x 3 m por planta, la cual empezará a fructificar despues de 3 años. Por otra parte, en Hawái se cosecha durante todo el año, excepto si intervienen factores meteorológicos (Nelson, 2003); por tanto, en promedio, se cosechan dos o tres veces por mes y disminuye en temporada de invierno (Chan-Blanco et al., 2006).

Tabla 3

Manejo de riego desde la siembra

	Modo	Cantidad	Duración
Pozo de siembra	Mojar completamente	ND	3 días consecutivos
Siembra	Riego por goteo	4 L de agua/planta/día	3 meses
Planta	Riego	8 L de agua/planta/día	9 meses
Planta	Riego	12 L de agua/ planta/día	Hasta los 2 años
Árbol	Riego	15 L de agua/árbol/día	ND

ND: No determinado.

Fuente: Elaboración propia con información de Peter y Peter (2018).

En San Francisco, Campeche, México, el noni es muy conocido y es un recurso natural que se encuentra disponible durante la mayor parte del año (Valencia et al., 2017). En Guerrero ha aumentado la demanda de noni, específicamente en la “Costa Grande” (Ayvar et al., 2018). Ulloa et al. (2012) refieren que en México el mayor exponente y productor de noni es el estado de Nayarit, que se encuentra en el oeste del país, con una superficie de 28 ha, y una producción de alrededor de 204 toneladas, sin embargo, esas cifras fueron representadas en 2010 por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). En fechas recientes, la distribución y producción se ubica principalmente en los estados de Guerrero, Nayarit, Jalisco, Veracruz, Michoacán y Tabasco, que están directamente conectados con el Océano Pacífico o con el golfo de México y se registran en total 50.30 ha cosechadas, y una produccion de 406.93 toneladas y el valor se aproxima a los \$2 614 770 (SIAP, 2017). Las ciudades más influyentes para la siembra y cultivo son: Tecpan de Galeana, Guerrero, y San Blas, Nayarit.

La capacidad de producción de noni por árbol es de 250 a 300 kg después de 7-8 años de cultivo y en la etapa principal es capaz de producir hasta 30 kg a 40 kg por planta (Chan-Blanco et al., 2006). Gupta (2020) hace mención de que el rendimiento del árbol del noni en el quinto año produce alrededor de 24 a 29

kg (Tabla 4), con la diferencia de que fue cultivado en el norte de la India, por lo tanto, se encuentran con diferentes condiciones climatológicas, que influyen en su periodo vegetativo, aun así, existen algunos agricultores que prefieren podarlo y no cultivar en los primeros dos años (Figura 2), con la finalidad de que el arbusto crezca derecho, con ramas más verticales y fuertes (Nelson, 2001). La cosecha se realiza manualmente mientras el fruto se encuentre en un estado ligeramente blanco, el cual soporta muy bien el ser transportado en cestas, la exposición a la luz y las altas temperaturas (Ulloa et al., 2012).

Tabla 4

Rendimiento aproximado de un árbol de noni en el norte de la India

Mes	Rendimiento por árbol
Hasta 24 meses	No
2do año	5.5-6.5 kg
3er año	11-16 kg
4to año	16-21 kg
5to año	24-29 kg

Fuente: Gupta (2020).

Con una población de 638 plantas por hectárea (Figura 3), en buenas condiciones se predispone a una producción de 7 toneladas/ha en el segundo año, y después del quinto año: 70 toneladas/ha (Chan-Blanco et al., 2006). Se estima que la vida útil de un árbol es de 40 hasta 50 años, y la cosecha varía entre 6 a 7 veces al año (Peter y Peter, 2018).

Figura 2

Árbol de noni de un año



Fuente: propia de los autores.

Figura 3

Cultivo de árboles de noni en Gómez Farías



Fuente: propia de los autores.

Para el almacenamiento, es importante considerar la refrigeración, no obstante, a temperaturas de 0 y 5 °C se pueden sufrir daños severos por frío, por lo cual, la recomendación y la mejor temperatura de almacenamiento es de 15 °C, ya que es posible incrementar hasta 12 días su vida postcosecha. El noni, mientras es almacenado, puede perder ligeramente peso, incluso incrementar su pH y °Brix (López et al., 2013).

Importancia socioeconómica del noni y comercialización

El noni, a lo largo de la historia, ha tenido diversidad de usos en diferentes lugares del mundo. En los últimos tiempos debido a las cualidades medicinales que a esta fruta y a otras partes de la planta se les adjudica, ha ganado importancia comercial internacional, probablemente a consecuencia de su uso terapéutico en la cultura Polinesia. Es probable que los usos tradicionales, aunado a algunas prácticas comerciales, principalmente por curanderos oriundos de Hawái, fueran los responsables de propagar el uso de *Morinda citrifolia* como planta medicinal; no obstante, la idea del noni como una planta medicinal, se ha reforzado debido las recientes evidencias científicas acerca de los posibles beneficios a la salud que conlleva el uso de esta planta (McClatchey, 2002). Sin embargo, el noni no siempre se ha visto como una planta medicinal, en principio porque ha tenido diversidad de usos por numerosas culturas a lo largo de la historia, por ejemplo, usado para teñir ropa o como alimento. Probablemente el primer registro de consumo humano de noni fue en épocas de hambruna en los antiguos pueblos de Hawái (Lucas y Williams, 1982). Es de hecho en Hawái donde se tiene un buen registro de la comercialización de noni, sobre todo para usos medicinales, un comercio que se ha ido expandiendo a otros mercados a nivel mundial.

Bajo esta premisa, la comercialización internacional del noni incrementó durante la etapa intermedia de los años 90, cuando el número de compañías dedicadas a la elaboración de productos a base de noni, tales como cápsulas, bebidas en polvo, líquidos y lociones, empezó a crecer de manera exponencial. Este hecho se debió a una multitud de factores, pero en gran medida se atribuye a que la FDA incluyó al noni dentro de la lista de productos seguros para el consumo, facilitando su distribución y comercialización (Dixon et al., 1999). Siendo Estados Unidos y Japón el mayor mercado de noni, incluyendo a un potencialmente lucrativo mercado europeo emergente, es que esta planta ha empezado a tener relevancia dentro del ámbito comercial en los últimos años. El mercado mundial de la comercialización del jugo de noni en 2004 osciló en un valor aproximado de entre \$700 y \$750 millones de dólares (Macpherson et al., 2007), lo cual sugiere un área de mercado con un importante potencial para la producción y posterior comercialización del noni.

Durante el año 2019, en México se produjo un total de 407 toneladas de noni, con un valor de producción total de 2.616 miles de pesos en 50 ha de superficie cosechada, siendo los estados de Nayarit, Guerrero y Jalisco los mayores productores de este cultivo (SNICS, 2020). En años posteriores, el cultivo de noni no se ha registrado dentro de los datos anuales de cierre de producción agrícola a nivel nacional, probablemente porque la siembra de esta planta no resulta rentable cuando es comparada con el valor de producción obtenido por otros cultivos; no obstante, el noni se sigue comercializando en territorio mexicano, pero con una importancia relativa menor comparada con el de otras plantas comestibles (Martínez et al., 2021).

Composición química

El contenido nutricional del noni se ha identificado mediante pruebas bromatológicas, cuya comparación en diferentes lugares se muestra en la Tabla 5; en cuanto a la concentración de carbohidratos totales, oscila de 2.68-7.2%; mientras que Faria et al. (2014) indican que contiene 3.71% de carbohidratos reductores, Bresson et al. (2009) manifiestan que de glucosa tiene 1.3 g/100 g y de sacarosa <0.1 g/100 g; las proteínas oscilan entre 0.55-4.2%, los lípidos: 0.04-2.15%. Ali et al. (2016) mencionan que la mayoría de los aminoácidos provienen de las hojas, mientras que los ácidos como el caproico, caprílico, hectanoico y octanoico provienen de la fruta. Con respecto al ácido ascórbico, su concentración varía de 23.10 hasta 154.2 mg/100 g, la diferencia se podría deber a que, mientras mayor es el estado de madurez, mayor cantidad de ácido ascórbico contiene (Sullón, 2009). A lo largo de un proceso de fermentación, la cantidad de flavonoides aumenta en el jugo de

noni; por otra parte, se identificaron alrededor de 73 compuestos volátiles, en los cuales el ácido octanoico, el ácido hexanoico y 2-heptanona fueron los principales (Wang et al., 2021).

Por otro lado, Dos Santos et al. (2020) muestran que el contenido de agua es de 90.83 %, fibra total 1-2.0 g/100 g, mientras que Nascimento et al. (2018) refieren que contiene 0.5 g/100 g de fibra soluble y 1.43 g/100 g de fibra insoluble, siendo la mayoría fibra insoluble de la fibra total. El valor energético es de 32.5-45.77 kcal/100 g, los micronutrientes con mayor repercusión son el sodio 17.65-55.5 mg, potasio 214.3-5013 mg, magnesio 26.1-368.3 mg, calcio 48.2-1065.3 mg, hierro 0.7-14.03 mg por cada 100 g de materia comestible; ahora bien, Nascimento et al. (2018) agregan que en cuanto al manganeso contiene 10 mg/100 g y selenio 84 mcg/100 g.

Tabla 5

Comparación de la composición nutricional del noni

Nutriente	Alto, Piauí, Brasil ^a	Ciudad de Cuiabá, Brasil ^b	Zé Doca, Maranhão, Brasil ^c	Campina Grande, Paraíba ^d	Universidad Estatal del Suroeste de la Bahía, Brasil ^e	Comisión Europea ^f
Carbohidratos	8.37 %	5.27 %	2.68 g/100 g	ND	ND	7.2 g/100 g
Carbohidratos reductores	ND	3.71 %	ND	ND	ND	ND
Glucosa	ND	ND	ND	ND	ND	1.3 g/100 g
Sacarosa	ND	ND	ND	ND	ND	<0.1 g/100 g
Proteína	2.24 %	2.36 %	4.2 g/100 g	1.15 %	ND	0.55 g/100 g
Lípidos	0.37 %	0.04 %	0.34 g/100 g	2.15 %	ND	0.10 g/100 g
Ácido ascórbico	23.10 mg/100 g	ND	33 mg/100 g	154.2 mg/100 g	140 mg/100 g	1.1 mg/100 g
Agua	ND	ND	ND	ND	90.83 %	ND
Fibra total	ND	1.00 %	0.59 g/30 g	ND	ND	2.0 g/100 g
Fibra soluble	ND	ND	0.15 g/30 g	ND	ND	ND
Fibra insoluble	ND	ND	0.43 g/30 g	ND	ND	ND
Valor energético total	45.77 kcal/100 g	ND	11.52 kcal/30 g	ND	ND	136 kJ/100 g
Sodio (Na)	ND	19.76 mg/10 g	16.65 mg/30 g	ND	ND	17 mg/100 g
Potasio (K)	ND	5013 mg/10 g	ND	ND	ND	214.3 mg/100 g

Nutriente	Alto, Piauí, Brasil ^a	Ciudad de Cuiabá, Brasil ^b	Zé Doca, Maranhão, Brasil ^c	Campina Grande, Paraíba ^d	Universidad Estatal del Suroeste de la Bahía, Brasil ^e	Comisión Europea ^f
Magnesio (Mg)	ND	ND	110.49 mg/30 g	ND	ND	26.1 mg/100 g
Calcio (Ca)	ND	ND	319.61 mg/30 g	ND	ND	48.2 mg/100 g
Manganeso (Mn)	ND	ND	3.00 mg/30 g	ND	ND	ND
Hierro (Fe)	ND	ND	4.21 mg/30 g	ND	ND	0.7 mg/100 g
Selenio (Se)	ND	ND	25.20mcg/30 g	ND	ND	ND

ND: No determinado

^a (Costa et al., 2013) ^b (Faria et al., 2014) ^c (Nascimento et al., 2018) ^d (de Alcântara Ribeiro et al., 2019) ^e (Dos Santos et al., 2020) ^f (Bresson et al., 2009).

Propiedades terapéuticas y nutritivas del noni

En 2001 se conocían cerca de 160 compuestos fitoquímicos presentes en el noni, entre ellos resaltan los compuestos fenólicos y los alcaloides (Wang y Su, 2001). A través de los años se han encontrado cada vez más compuestos, con un aproximado de 200 fitoquímicos en el fruto y en las hojas del noni (Singh, 2012). En la Tabla 6 se muestran algunos componentes bioactivos de la *Morinda citrifolia* Linn, entre ellos, los más característicos son los carotenoides, antroquinonas como el damnacantal, nordamnacantal, la morindona, rubiadinas, cumarinas como la escopoletina; sin embargo, los que predominan son los compuestos fenólicos y los alcaloides.

Stadlbauer et al. (2005) consideran a las antraquinonas como el compuesto más tóxico que se le atribuye al noni, ahora bien, West et al. (2006) añaden que el impacto en el organismo por el grupo de las antraquinonas es inconcluso, por lo que no se debe suponer que se tendrá el mismo resultado de acción tóxica que otra. Se descubrió que el nordamnacantal, el cual es un derivado de una antraquinona, con 10 mg/kg/día, inhibió el crecimiento de células MDA-MB231 y las MCF-7 *in vitro* y con 50 mg/kg de peso corporal redujo el crecimiento de tumores 4T1 *in vivo* y fue capaz de incrementar la inmunidad, aumentando las células T (Abu et al., 2018).

La pulpa muestra una cantidad de carotenoides de 3.90 mg/100 g y fenoles totales de 109.81 mg/100 g en extracto acetónico y 20.33 mg/100 g en extracto etanólico (Costa et al., 2013). No obstante, se comparó el jugo de noni de seis diferentes zonas: Samoa, Indonesia, China, Hawái, Tailandia y Taití, y se mostró que en el fruto de Indonesia la cantidad de polifenoles es mayor a las otras, seguido de Tailandia y de Hawái. Además, por cada 100 mL de jugo de noni, en Tailandia se han determinado concentraciones mayores de escopoletina y rutina

de 8.62 y 2.03 mg, respectivamente (Kim et al., 2017). En México, se evaluó en extracto etanólico y acuoso a temperatura ambiente y caliente y resultó positivo en quinonas, flavonoides, alcaloides y triterpenos (Valencia et al., 2017). En cambio, por un método DPPH se observó la presencia de catequinas, flavonas, flavonoles, leucoantocianidinas, saponinas, taninos y xantonas (Rodrigues et al., 2017).

Tabla 6

Componentes bioactivos de la Morinda citrifolia Linn identificados por varios autores

Compuesto bioactivo	Fuente
Ácido gálico	(Ali et al., 2016)
Ácido ursólico (triterpenoide)	(Ali et al., 2016)
Alcaloides	(Abou et al., 2017; Faria et al., 2014; Valencia et al., 2017)
Alizarina	(Mahanthesh et al., 2013; Ali et al., 2016)
Antraquinonas	(Faria et al., 2014)
Aucubina	(Mahanthesh et al., 2013)
Azúcares reductores	(Abou et al., 2017)
Catequinas (polifenol)	(Rodrigues et al., 2017)
Carotenoides	(Costa et al., 2013; Ali et al., 2016)
Citrifolinosido	(Ali et al., 2016)
Cumarinas	(Faria et al., 2014)
Damnacanthal (antraquinona)	(Mahanthesh et al., 2013; Ali et al., 2016)
Escopoletina (cumarina)	(Mahanthesh et al., 2013; Kim et al., 2017; Ali et al., 2016)
Esteroides	(Abou et al., 2017)
Fenoles	(Abou et al., 2017; Faria et al., 2014; Dos Santos et al., 2020; Costa et al., 2013)
Flavonas	(Rodrigues et al., 2017)
Flavonoides	(Abou et al., 2017; Faria et al., 2014; Valencia et al., 2017)
Glucósidos de antraquinona	(Mahanthesh et al., 2013)
Leucoantocianidinas	(Rodrigues et al., 2017)
Morindona (antraquinona)	(Mahanthesh et al., 2013)
Nordamnacanthal (antraquinona)	(Mahanthesh et al., 2013)

Compuesto bioactivo	Fuente
Quercetina (flavonoide)	(Ali et al., 2016)
Quinonas	(Valencia et al., 2017)
Rubiadina (antraquinona)	(Mahanthesh et al., 2013)
Rubiadina-1-metil éter	(Mahanthesh et al., 2013)
Rutina (flavonoide)	(Kim et al., 2017)
Saponinas (triterpenoides)	(Abou et al., 2017; Faria et al., 2014; Rodrigues et al., 2017)
Taninos (flavonoides)	(Abou et al., 2017; Faria et al., 2014; Rodrigues et al., 2017)
Terpenoides (terpenos)	(Abou et al., 2017; Valencia et al., 2017; Ali et al., 2016)
Xantonas	(Rodrigues et al., 2017)
Xeronina (alcaloide)	(Ali et al., 2016)

Fuente: Elaboración propia.

La presencia de estos compuestos bioactivos ha sido investigada con el fin de evaluar los posibles efectos biológicos que tienen sobre ciertas patologías.

Efecto antidiabético: se realizó un estudio donde se evaluaron muestras de sangre, que incluía pruebas como: glucosa, HbA1c, C-péptidos, hs-CPR, triglicéridos, colesterol total, LDL y HDL, fue aplicado en 20 personas durante 2 meses sin interrupción, con una dosis de 2 mL/kg por día; como resultado, se mostró una reducción considerable de glucosa sanguínea y HbA1c, aumentó la excreción de la insulina y mejoraron los niveles de colesterol, por esta razón, los autores recomiendan añadir el jugo de noni en la dieta de pacientes con diabetes tipo 2 (Algenstaedt et al., 2018). De igual manera, Mootoosamy y Mahomoodally (2014), elaboran un listado de plantas medicinales que pueden ser utilizadas de manera profiláctica para la diabetes tipo 2, con la recomendación de beber 1 copa de jugo de noni 3 veces por semana.

Efecto antioxidante y antiinflamatorio: en un estudio se provocó, mediante carragenina como modelo inflamatorio, un edema en ratas para evaluar los efectos oxidantes y antioxidantes por medio de las pruebas de reactivos de oxígeno y componentes derivados de metabolitos (d-ROMs) y potencial antioxidante biológico (BAP) de un producto de jugo de noni, por lo que, la capacidad oxidante disminuyó en los grupos que se les administró en la segunda hora, y la capacidad antioxidante del grupo fue mayor en la segunda hora, atribuyéndole estos efectos a compuestos de flavonoides como: quercetina, isoquercetina y rutina, cumarinas como: escopoletina y esculetina (Yilmazer et al., 2016). De modo similar, se demostró

que contienen efectos antiinflamatorios bronquiales con dosis de 1-10 mL/kg en ratas, debido a que tiene una actividad bloqueadora de canales de calcio, además de atribuirle este efecto a los compuestos fenólicos y cumarinas; por lo tanto, el jugo de noni puede reducir la problemática de inflamación en enfermedades como el asma (Dussosoy et al., 2016). En otro estudio, se extrajeron polisacáridos del noni -heteropolisacárido-, que contiene en su mayoría homogalacturonano y residuos de arabinogalactano en dosis de 10 mg/kg, el cual se experimentó en modelo de ratas con edemas inducido por carragenina, como resultado, tuvo efectos de inhibición de migración de leucocitos a la zona inflamada, atribuido a los polisacáridos, por lo que se concluyó que estos componentes tienen propiedades antiinflamatorias (Sousa et al., 2018). Paralelamente, Batista et al. (2020) observaron efectos positivos en el tratamiento de la colitis ulcerosa al utilizar un extracto de polisacáridos presentes en el jugo de noni al reducir la infiltración de células inflamatorias en ratones. Lohani et al. (2019) analizaron las sustancias bioactivas que tienen efectos inmunomodulatorios del noni, concluyendo que es necesaria una investigación más exhausta utilizando un rango más amplio de las concentraciones utilizadas y la identificación de sus mecanismos de acción farmacológicos.

Efecto antimicrobiano y antifúngico: las semillas del noni se le apropian efectos antimicrobianos, debido a que en estudios con extractos metanólicos se mostró una eficaz actividad frente al *Staphylococcus* resistente a meticilina, donde la cumarina: escopoletina, fue a la que se le atribuyó dicho efecto (Sánchez et al., 2019). En otro estudio, las hojas del noni fueron evaluadas para determinar su efecto contra el crecimiento del hongo *Colletotrichum acutatum*, basado en la reducción en el crecimiento del micelio; y al día 11 de observación, el 60% de las hojas del noni inhibió el crecimiento del hongo *C. acutatum* (Aji y Roosyidah, 2020).

Efecto anticancerígeno: en Malasia, la hoja de *Morinda citrifolia* Linn se comparó con un fármaco anticanceroso (erlotinib) en 40 ratones inducidos por tumores con metástasis de pulmón e hígado, como resultado, el extracto de hoja de noni (300 mg/kg) aminoró con mayor eficacia en relación con el fármaco (50 mg/kg), esto gracias a la escopoletina y a la epicatequina (Lim et al., 2017). Por añadidura, se evaluó el noni en células cancerosas como MCF-7, MDA-MB-231 (adenocarcinoma de mama), y una célula no cancerosa HEK-293, dando como resultado que el extracto obtenido con acetato de etilo tuvo una potente inhibición de la proliferación de las líneas celulares, además aumentó las células apoptóticas (Sharma et al., 2016). Por otra parte, en un estudio de ratas, se les administraron 5 mL/kg de peso en distintos porcentajes de jugo de noni, dos veces al día por sonda oral, como resultado, aumentó la concanavalina A, producida por la proliferación de los linfocitos (Pratap et al., 2018). Además, durante 6 semanas un grupo de ratas

fue sometido a un tratamiento con 7.12-dimetilbenz(a)antraceno (DMBA) con 3 días de exposición al humo de cigarrillo y posteriormente se aplicó el jugo de noni; los resultados mostraron que en dosis de 90 mg/kg se disminuyó la proliferación de citocinas, asimismo, se controló la activación del regulador T, con la finalidad de prevenir tumores (Agustina et al., 2020).

Efecto antidiarreico: la *Morinda citrifolia* Linn participó en un estudio en el cual se evaluó la incidencia de diarrea en cerdos posdestete, posteriormente al efecto de una mezcla de hojas *Anacardium occidentale* o marañón (40 %), *Psidium guajava* o guayaba (20 %), *Moringa oleífera*, mejor conocida como moringa (20 %) y la *Morinda citrifolia* Linn o noni (20 %), las cuales tienen en común propiedades nutraceuticas. Los resultados mostraron una reducción en las diarreas de los cerdos, sin embargo, el efecto fue muy similar a un antibiótico promotor de crecimiento (Aroche-Ginarte et al., 2017). A pesar de que los estudios en humanos han sido limitados, Mubarak et al. (2023) atribuyen que el efecto antidiarreico de las hojas de noni se debe a la existencia de varios tipos de ingredientes activos, siendo los taninos del noni los que pueden encoger las membranas mucosas para que se absorba más agua y se ralentice el proceso de defecación, ya que tienen propiedades astringentes. Además, la presencia de compuestos flavonoides que pueden inhibir la motilidad intestinal, reducen la secreción de líquidos y electrolitos.

La población ha mostrado interés en las propiedades y beneficios del noni, de tal manera que se podría considerar como un superalimento, ya que proporciona vitaminas, minerales y fitoquímicos. Se ha encontrado y evidenciado que contribuye a mantener en homeostasis la glucemia, así como sus efectos antioxidantes, antiinflamatorios, antimicrobianos, antifúngicos, anticancerígenos, antidiarreicos y otros más. A pesar de que su mal sabor y olor resultan desagradables para algunos individuos, puede ser beneficioso si se integra en la dieta humana.

Usos y aplicaciones del noni y sus subproductos

Existen diversas maneras para utilizar esta materia prima. Se puede aprovechar la fruta y otras partes de la planta. Para ilustrar de mejor manera, en la parte sureste del continente asiático y en regiones de las islas polinesias, se utiliza la fruta, las flores, las hojas, la corteza del árbol, incluso la raíz. Sin embargo, debido al sabor del noni, que no resulta del todo agradable para la mayoría de la población, se han propuesto maneras para reducir el sabor, como: la microencapsulación, en donde los compuestos fenólicos y los flavonoides no son alterados por esta técnica; no obstante, se reduce el contenido del ácido ascórbico (Rodríguez-Barahona et al., 2015).

Su considerable cantidad de agua -aproximadamente el 90 %- es un atributo muy importante en la elaboración de bebidas, debido a su rentabilidad y producción,

pero, la barrera del sabor y el olor será una de las mayores complicaciones. Por ello, las tecnologías alimentarias buscan enmascarar el sabor y el olor hasta lograr un grado de aceptación del público consumidor. Por ejemplo, en Cuba se desarrolló un refresco a partir de fruto seco de noni con el fin de utilizarlo como producto nutracéutico, en el cual se pudo enmascarar el sabor y el olor característico del noni con la ayuda de saborizantes y edulcorantes (De la Paz Martín-Viaña et al., 2011).

Asimismo, en Lima, Perú, se realizó una bebida formulada con noni, mango y aguaymanto, la cual fue considerada funcional por sus propiedades antioxidantes, cuyas cantidades óptimas fueron repartidas entre 7 % de pulpa de noni, 93 % de mango y 0 % de aguaymanto, la cual tuvo una inhibición del 25.58 % de radicales libres, por lo cual, se considera una bebida funcional; sin embargo, con esas concentraciones se tuvo una aceptabilidad del 7.38, destacando que la concentración de pulpa de noni fue relativamente baja (Alfaro, 2019).

Por otra parte, se elaboró una bebida sucedánea al café, cuyo procedimiento se logró gracias a que el noni se tostó y se molió, añadiendo azúcar, canela, esencia de vainilla y agua (El Salous et al., 2018). Se han elaborado, además de las bebidas, polvo para la elaboración de galletas; se experimentó con varias formulaciones para analizar cuál se mantenía en mejores condiciones. Como resultado, se utilizó 94 % de harina, 6 % de polvo de noni, 35 % de azúcar, 50 % de mantequilla, 50 % de huevo y 2.5 % de levadura en polvo; sin embargo, debido al uso de polvo de noni el valor de luminosidad disminuyó (Kim y Lee, 2015). Ahora bien, en San Luis Potosí, México, un yogurt fue adicionado con noni; primeramente se deshidrató la fruta de noni, y para aminorar las pérdidas de sus propiedades se sometió a una temperatura de 60 °C durante 12 horas, posteriormente, se molió y se tamizó para tener partículas muy finas, y así al mezclar el polvo de noni a un yogurt (4 %), el color del polvo fue un café claro, por cierto, en la primera hora se extrajo alrededor de un 60 % de humedad y finalmente el producto logró tener un 10% de humedad, lo que aumenta su vida de anaquel; por último, el yogurt con el noni añadido logró un 68% de aceptación, debido a la reducción del olor y el sabor que se produce durante la deshidratación del noni (Zavala et al., 2014). Incluso se ha propuesto llevar a cabo mermeladas a base de noni con maracuyá, con los ingredientes: 45% de azúcar, 1 % pectina, 0.15 % ácido cítrico y 0.05 % benzoato de sodio, cuya proporción con más aceptación (35 %) fue la del noni con el 70 % y maracuyá con 30 % de acuerdo con los resultados de la evaluación sensorial realizada mediante prueba descriptiva utilizando escalas de intervalo de cuatro puntos (Benavides, 2013).

El fruto del noni, al igual que sus hojas son un producto muy valorado en el mercado por su uso como alimento con propiedades medicinales. Algunas de las formas más populares en que el noni es comercializado es en forma de jugos

y puré. Es en esta última presentación en que normalmente, las semillas de esta planta son desechadas. Sin embargo, es posible elaborar aceite vegetal a partir de estas semillas, el cual es una buena fuente de vitamina E y ácido linoleico (West et al., 2008). Otra parte poco aprovechada de esta planta son sus raíces, las cuales son una fuente importante de antraquinonas (Deng et al., 2007,) las cuales pueden ser bien utilizadas por su actividad larvícida (Ee et al., 2009). Algunas culturas han aprovechado ancestralmente las hojas del noni para el tratamiento de heridas, ya sea en forma de infusiones o con aplicación directa sobre la herida. El interés para saber si estas prácticas son válidas o no, ha impulsado el estudio de sus características, evidenciando la capacidad bactericida de estas hojas (Zhang et al., 2016).

Alrededor del mundo, los productos a base de noni han alcanzado un estimado de \$400 millones de dólares de valor en el mercado (Macpherson et al., 2007). Potterat y Hamburger (2007) afirman que se han alcanzado \$1300 millones de dólares por año. Aun sin tener evidencia clara para ilustrar mejor el aceite de semilla de noni, debido a su compleja producción se oferta a 400 dólares el galón (Palu et al., 2012); acto seguido, se podrían contemplar otras alternativas, además de las comestibles, aplicando las tecnologías en los alimentos para aprovechar sus componentes bioactivos en el desarrollo de productos innovadores, cambiando su funcionalidad. Sin embargo, Abou Assi et al. (2017) resaltan que, aunque las estructuras del noni poseen un amplio rango de compuestos bioactivos y poseen aplicaciones terapéuticas en el laboratorio, la transformación de estas propiedades en productos con altos estándares de calidad es todavía limitado.

Usos alternativos para el aprovechamiento integral del noni

El noni es un alimento tan versátil que, dejando de lado sus usos como alimento, se puede aprovechar en su totalidad gracias a sus propiedades benéficas y sus compuestos bioactivos; prueba de ello fue que se utilizó el factor antimicrobiano y se realizó un jabón transparente enriquecido con noni, ñame, pétalo de rosa y betel (Rosyida et al., 2019). Incluso, se experimentó con extractos del fruto de noni, para uso de insecticida sobre las larvas de *Spodoptera frugiperda*, con una tasa de mortalidad del 32 % (Sánchez y Rodríguez, 2017).

En suma, el puré de noni también ha sido utilizado para la fabricación de queso, a causa de su actividad proteolítica muy similar a la bromelina, a pesar de todo, mencionan que el queso tuvo textura con grietas, un grado alto de humedad y, además, un ligero sabor amargo, no obstante, tuvo buena aceptabilidad, asimismo, un 60 % de intención de compra (De Farias et al., 2020).

En Indonesia se desarrolló un inhibidor de corrosión verde a base de extracto de noni, aplicado al acero con bajo contenido de carbono, con el fin de utilizar una

materia prima orgánica y dejar de lado los costosos y dañinos inhibidores inorgánicos, los ingredientes fundamentales del fruto fueron los flavonoides y los ácidos ascórbicos que funcionan como antioxidantes; por lo tanto, mientras aumenta la cantidad de noni hasta 3 ppm disminuye la velocidad de corrosión del acero, así que se le atribuye el potencial de inhibir la corrosión verde en acero con bajo contenido de carbono con una eficiencia del 76.92 % (Kusumastuti et al., 2017).

Por último, es recomendable innovar para aprovechar el noni en el desarrollo de nuevos productos, así como la deshidratación, ya que al someterlo al aire caliente es común que este pierda sus propiedades sensoriales, de esta manera, aumentaría la vida útil y su aceptación en la población mexicana. Se podría aplicar ligeramente una mezcla de chiles, aunque se conoce que es alto en humedad y los costos podrían resultar elevados. Otra opción sería la elaboración de un helado funcional adicionando una fruta para enmascarar el sabor, como el mango o la fresa y un estabilizante como la goma guar, con el cual, mediante un diseño experimental, se debería de identificar la mejor textura y aceptabilidad para el consumidor, tratando de priorizar el noni como ingrediente principal. Más aún, sería interesante el procesamiento del noni para la producción de bebidas alcohólicas mediante fermentación. Por ejemplo, Guo et al. (2020) señalan que, aunque la fruta de noni tenga más capacidad antioxidante que el jugo de noni fermentado, este último contiene efectos positivos en el daño hepático inducido por alcohol. Con esta variedad de productos se podría generar en las microempresas locales y nacionales productoras de noni, una bioeconomía sostenible y circular, debido a la generación de puestos de trabajos en el sector agropecuario, en el desarrollo de productos innovadores, incluso convertir las zonas donde se encuentra el sembradío, en zonas recreativas, para las personas interesadas en el procesamiento del noni, para la obtención de concentrados de sus jugos, el cual es uno de los principales productos comerciales de este fruto.

Perspectivas y tendencias en el desarrollo de nuevos productos derivados del noni

A pesar de que el Estado de Tamaulipas no destaca en cuanto a la producción del noni, específicamente en Ciudad Mante es donde este cultivo comenzó a ser sembrado y cosechado a pequeña escala, por lo que las cifras de producción no se han reportado por parte del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Los pequeños productores de este fruto expresan algunas necesidades que les permitan extender su cultivo y mejorar su comercialización al darle un valor agregado mediante el desarrollo de nuevos productos alimentarios para alargar su vida útil, en donde además de la pulpa, sean aprovechadas también su

cáscara y las semillas, para generar la menor cantidad de subproductos, los cuales tienen un impacto ambiental y económico; y por otro lado ver la posibilidad de una valorización de los mismos a través del desarrollo de bioproductos. Por ello, se proponen estrategias basadas en una mayor concientización sobre el consumo de alimentos con altas concentraciones de compuestos bioactivos que influyen de manera positiva y preventiva en ciertas enfermedades por sus múltiples beneficios:

- Elaboración de bioproductos para la industria agropecuaria, cosmetológica y de salud, aprovechando los nutrientes y compuestos bioactivos presentes en el noni.
- Comercialización de bioproductos en el sector rural turístico y de salud.
- Desarrollo de esquemas de producción y comercialización a largo plazo para la generación de nuevos bioproductos asociados a cadenas y clientes específicos.
- Gestión de trabajo colaborativo y de redes, integradas por actores de gobierno, investigadores, comunidad y empresarios para la planeación del desarrollo de la bioeconomía y del territorio.
- Diseño y producción de empaques biodegradables adecuados a los bioproductos que se comercializarían.
- Programas de mercadotecnia y registros de protección para la propiedad intelectual que corresponda.

Estas estrategias permitirán aprovechar los múltiples beneficios que ofrece este fruto e impulsar la economía de las regiones en que se está cultivando actualmente. Esta investigación sienta las bases para continuar posteriormente con la implementación y evaluación de estrategias que involucren a la mayoría de los actores para que participen y trabajen de manera conjunta y multidisciplinaria.

Conclusiones

Los micronutrientes de mayor relevancia presentes en el noni son: el ácido ascórbico, potasio y calcio, además brinda compuestos bioactivos, cuyos más abundantes son: alcaloides, compuestos fenólicos y antraquinonas, incluso se ven reflejados en los beneficios para el organismo, ya que se le atribuye que es: antidiabético, antioxidante, antiinflamatorio, antimicrobiano, antifúngico, anticancerígeno y antidiarreico. Por medio de las tecnologías alimentarias, se pueden desarrollar bioproductos a base de noni como: bebidas, productos de panificación y productos lácteos, y existen propuestas en los lugares de mayor producción de este fruto para el desarrollo de productos alternativos, como jabones, insecticidas, coagulador de quesos y para la inhibición de corrosión verde. En ocasiones, se le conoce solo como una fruta, o

también como un superalimento por sus propiedades funcionales y terapéuticas. Gracias a sus propiedades organolépticas fuertes, el noni podría ser utilizado para la formulación de nuevos productos alimenticios y contribuir a la economía de las zonas donde se cultiva. El noni es un fruto con múltiples compuestos bioactivos y nutrientes que tienen efectos funcionales y nutricionales y se ha integrado en algunos productos alimenticios, sin embargo, es necesario seguir fomentando su producción y consumo en la población para aprovecharlo de manera integral.

Referencias

- About Assi, R., Darwis, Y., Abdulbaqi, I. M., Khan, A. A., Vuanghao, L., y Laghari, M. H. (2017). *Morinda citrifolia* (noni): A comprehensive review on its industrial uses, pharmacological activities, and clinical trials. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(5), 691-707. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.018>
- Abu, N., Zamberi, N. R., Yeap, S. K., Nordin, N., Mohamad, N. E., Romli, M. F., . . . Alitheen, N. B. (2018). Subchronic toxicity, immunoregulation and anti-breast tumor effect of Nordamnacantal, an anthraquinone extracted from the stems of *Morinda citrifolia* L. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 18(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s12906-018-2102-3>
- Agustina, D. W., Wahyuningsih, M. D., Widyarti, S., Soewondo, A., Tsuboi, H., y Rifa'i, M. (2020). Noni juice (*Morinda citrifolia*) to prevent cancer progression in mice induced DMBA and cigarette smoke exposure. *Pharmacognosy Journal*, 12(5). <https://doi.org/10.5530/pj.2020.12.134>
- Aji, O. R., y Roosyidah, L. H. (2020). Antifungal activity of *Morinda citrifolia* leaf extracts against *Colletotrichum acutatum*. *Biogenesis: Jurnal Ilmiah Biologi*, 8(1), 49-54.
- Alfaro, S. C. C. (2019). *Diseño de una bebida funcional con capacidad antioxidante a base de pulpa de mango (Mangifera indica L.), noni (Morinda citrifolia) y aguaymanto (Physalis peruviana L.)* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Federico Villarreal].
- Algenstaedt, P., Stumpenhagen, A., y Westendorf, J. (2018). The effect of *Morinda citrifolia* L. fruit juice on the blood sugar level and other serum parameters in patients with diabetes type 2. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2018/3565427>
- Ali, M., Kenganora, M., y Manjula, S. N. (2016). Health benefits of *Morinda citrifolia* (Noni): A review. *Pharmacognosy Journal*, 8(4). <https://doi.org/10.5530/pj.2016.4.4>
- Aroche-Ginarte, R., Martínez-Aguilar, Y., Ayala-González, L., Rodríguez-Bertot, R., y Rodríguez-Fraga, Y. (2017). Comportamiento productivo e incidencia de diarrea en cerdos posdestete suplementados con polvo mixto de hojas de plantas con propiedades nutraceuticas. *Ciencia y Agricultura*, 14(2), 19-26. <https://doi.org/10.19053/01228420.v14.n2.2017.7145>

- Ayvar, S., Díaz, J., Plancarte, P., Vargas, M., Alvarado, O., Tejeda, M., y Mena, A. (2018). *Colletotrichum tropicale* causal agent of anthracnose on noni plants (*Morinda citrifolia*) in Guerrero, México. *Plant Pathology & Quarantine*, 8(2), 165-169.
- Barba Evia, J. R. (2018). México y el reto de las enfermedades crónicas no transmisibles. El laboratorio también juega un papel importante. *Revista Latinoamericana de Patología Clínica y Medicina de Laboratorio*, 4-17.
- Batista, J. A., Magalhães, D. A., Sousa, S. G., Ferreira, J. D., Pereira, C. M., Lima, J. V., ... Barbosa, A. L. (2020). Polysaccharides derived from *Morinda citrifolia* Linn reduce inflammatory markers during experimental colitis. *Journal of Ethnopharmacology*, 248, 112303. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112303>
- Benavides, E. V. (2013). *Mermelada de noni (Morinda citrifolia)* con adición de maracuyá (*Passiflora edulis*) como saborizante natural. (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ). <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/237>
- Bresson, J. L., Flynn, A., Heinonen, M., Hulshof, K., Korhonen, H., Lagiou, P., . . . Verhagen, H. (2009). Opinion on the safety of Tahitian Noni®' *Morinda citrifolia* (noni) fruit puree and concentrate' as a novel food ingredient [1]: Scientific opinion of the panel on dietetic products nutrition and allergies. *EFSA Journal*, 7(4 -998-). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.998>
- Chan-Blanco, Y., Vaillant, F., Perez, A. M., Reynes, M., Brillouet, J. M., y Brat, P. (2006). The noni fruit (*Morinda citrifolia* L.): A review of agricultural research, nutritional and therapeutic properties. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6-7), 645-654.
- Costa, A. B., Oliveira, A. M., Silva, A. M., Mancini-Filho, J., y Lima, A. D. (2013). Atividade antioxidante da polpa, casca e sementes do noni (*Morinda citrifolia* Linn). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 35(2), 345-354. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000200003>
- De Alcântara Ribeiro, V. H., Barros, S. L., Santos, N. C., de Alcântara Silva, V. M., Melo, M. O., y Nascimento, A. P. (2019). Influência da temperatura sobre a composição físico-química de noni desidratado (*Morinda citrifolia* L.). *Caderno Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 9(7), 7099. <https://doi.org/10.18378/cvads.v9i7.7099>
- De Farias, V. A., da Rocha Lima, A. D., Costa, A. S., de Freitas, C. D., da Silva Araújo, I. M., dos Santos Garruti, D., . . . de Oliveira, H. D. (2020). Noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit as a new source of milk-clotting cysteine proteases. *Food Research International*, 127, 108689. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108689>
- De la Paz Martín-Viaña, N., Peña, C. M., Menéndez, A. B., Salomón, S., Sanabia, M. L., Moreno, V. F., y Fernández, S. A. (2011). Desarrollo de refresco de noni para su uso como producto nutracéutico. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 16(3), 267-278.
- Deng, Y., Chin, Y.-W., Chai, H., Keller, W. J., y Kinghorn, A. D. (2007). Anthraquinones with quinone reductase-inducing activity and benzophenones from *Morinda citrifolia*

- (Noni) roots. *Journal of Natural Products*, 70(12), 2049-2052. <https://doi.org/10.1021/np070501z>
- Dixon, A. R., McMillen, H. y Etkin, N. L. (1999). Ferment this: The transformation of Noni, a traditional Polynesian medicine (*Morinda citrifolia*, Rubiaceae). *Economic Botany*, 53(1), 51-68. <http://www.jstor.org/stable/4256153>
- Dos Santos, A. F., Chaves, M. A., Bastos, T. D., Santos, C. T., Neto, M. A., Costa, T. V., . . . Castro, S. S. (2020). Efeito da filtração sobre as características físicoquímicas, constituintes fenólicos e cor da polpa de noni. *Brazilian Journal of Development*, 6(1), 1491-1501. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n1-101>
- Dussossoy, E., Bichon, F., Bony, E., Portet, K., Brat, P., Vaillant, F., . . . Poucheret, P. (2016). Pulmonary anti-inflammatory effects and spasmolytic properties of Costa Rican noni juice (*Morinda citrifolia* L.). *Journal of Ethnopharmacology*, 192, 264-272.
- Ec, G. C. L., Wen, Y. P., Sukari, M. A., Go, R., y Lee, H. L. (2009). A new anthraquinone from *Morinda citrifolia* roots. *Natural Product Research*, 23(14), 1322-1329. <https://doi.org/10.1080/14786410902753138>
- El Salous, A., Cevallos, K., Arcos, F., y Castro, A. (2018). Elaboración de una bebida (sucedánea) al café a base de noni (*Morinda citrifolia*). *INNOVA Research Journal*, 3(8), 77-85. <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/3781/6/Elaboraci%C3%B3n%20de%20una%20bebida%20%28suced%C3%A1nea%29%20al%20café%C3%A9%20a%20base%20de%20noni%20%28Morinda%20citrifolia%29.pdf>
- Faria, W., Bett, S., Santos, C., Brasil, A., Gauto, R., y Selhorst, A. (2014). Physicochemical characterization and preliminar phytochemical analysis of the noni fruit (*Morinda citrifolia* L.) produced in Cuiabá city-MT. *Revista Brasileira de Tecnologia*, 01(08), 1208-1215. <https://doi.org/10.3895/S1981-36862014000100006>
- Garay, C. Z., Acha, D. O., de Souza, A., y Collantes, D. I. (2010). Estudio químico del aceite esencial del fruto de *Morinda citrifolia* Linneo (noni). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 366-376. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v76n4/a07v76n4.pdf>
- González, L. N. y González, L. J. (2003). *Morinda citrifolia* Linn. Potencialidades para su utilización en la salud humana. *Revista Cubana de Farmacia*, 37(3), 1-12. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75152003000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Guo, M., Mao, B., Sadiq, F. A., Hao, Y., Cui, S., Yi, M., . . . Zhao, J. (2020). Effects of noni fruit and fermented noni juice against acute alcohol induced liver injury in mice. *Journal of Functional Foods*, 70, 103995. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103995>
- Gupta, R. K. (2020). Application and innovative cultivation of noni (*Morinda citrifolia*) in North Bihar. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 126-128.
- Kim, J. M., Jo, Y. J., y Hahn, D. (2017). Physicochemical properties, bioactive composition and antioxidant activities of noni fruit juices from different regions of cultivation.

- Korean Journal of Food Preservation*, 24(7), 1000-1006. <https://doi.org/10.11002/kjfp.2017.24.7.1000>
- Kim, S. H., y Lee, M. H. (2015). Quality characteristics of cookies made with *Morinda citrifolia* powder. *Culinary Science and Hospitality Research*, 21(3), 130-138.
- Krishnakumar, N. M., Latha, P. G., Suja, S. R., y Rajasekharan, S. (2015). A review on the ethnomedicinal, therapeutic and nutraceutical importance of “Noni”(*Morinda citrifolia* L.). *International Journal of Medicinal Plants and Natural Products*, 1, 1-14. <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijmpnp/v1-i3/1.pdf>
- Kumar, R. G. (2020). Application and innovative cultivation of noni (*Morinda citrifolia*) in North Bihar. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 126-128. <https://www.faunajournal.com/archives/2020/vol7issue1/PartB/7-4-39-654.pdf>
- Kusumastuti, R., Pramana, R. I., y Soedarsono, J. W. (2017). The use of *Morinda citrifolia* as a green corrosion inhibitor for low carbon steel in 3.5% NaCl solution. In *AIP Conference Proceedings*, 1823(1), 020012. <https://doi.org/10.1063/1.4978085>
- Lim, S. L., Mustapha, N. M., Goh, Y. M., Rahman, H. S., y Mohamed, S. (2017). *Morinda citrifolia* leaf extract suppressed metastasised cancer progression via EGFR and MAPK pathways. *Planta Medica International Open*, 4(1), e8-e16. <https://doi.org/10.1055/s-0043-107030>
- Lohani, M., Majrashi, M., Govindarajulu, M., Patel, M., Ramesh, S., Bhattacharya, D., y Dhanasekaran, M. (2019). Immunomodulatory actions of a Polynesian herb Noni (*Morinda citrifolia*) and its clinical applications. *Complementary Therapies in Medicine*, 47, 102206. <https://doi.org/10.1016/j.ctim.2019.102206>
- López, T., González, N., Jiménez, R., Guzmán, J., y May, M. E. (2013). Comportamiento de los frutos de noni (*Morinda citrifolia* L.) a diferentes temperaturas de almacenamiento poscosecha. *CienciaUAT*, 7(2), 37-41. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v7i2.16>
- Lucas, L., y Williams, J. (1982). *Plants of Old Hawaii*. Bess Press. L.%2C%20%26%20Williams%2C%20J.%20(1982).%20Plants%20of%20Old%20Hawaii.%20Bess%20Press&lr&hl=es&pg=PA2#v=onepage&q&f=false
- Macpherson, H., Daniells, J., Wedding, B. y Davis, C. (2007). The potential for a new value adding industry for noni tropical fruit producers. *RIRDC. Rural Instries Research and Development Corporation*. Australia Government. Publication No. 07/132. <https://agrifutures.com.au/wp-content/uploads/publications/07-132.pdf>
- Mahanthesh, M., Manjappa, A., Shindhe, M., Jamkhandi, C., Jalapure, S., y Patil, S. (2013). *Morinda citrifolia* Linn; a medicinal plant with diverse phytochemicals and its medicina relevance. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 3(1), 215-232. https://wjpr.s3.amazonaws.com/article_issue/138873940620%20WJPR%20773.pdf
- Martínez Moreno, D., Reyes Matamoros, J., López Pérez, A. L., y Basurto Peña, F. (2021). Importancia relativa de frutos y verduras comercializadas en el mercado de Izúcar de

- Matamoros, Puebla, México. *Polibotánica*, (51), 229-248. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.51.15>
- McClatchey, W. (2002). From Polynesian healers to health food stores: changing perspectives of *Morinda citrifolia* (Rubiaceae). *Integrative Cancer Therapies*, 1(2), 110-120. <https://doi.org/10.1177/1534735402001002002>
- Mootoosamy, A., y Mahomoodally, M. F. (2014). Ethnomedicinal application of native remedies used against diabetes and related complications in Mauritius. *Journal of Ethnopharmacology*, 151(1), 413-444. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.10.069>
- Mubarakah, F. A., Yuliasari, W., y Wibowo, T. S. (2023). Phytochemical screening of noni (*Morinda citrifolia* L) leaf ethanol extract in Pejagan Village, Bangkalan Regency. *Indonesian Journal of Interdisciplinary Research in Science and Technology*, 1(7), 661-668. <https://doi.org/10.55927/marcopolo.vli7.5879>
- Nascimento, L. C., da R Rodrigues, N., Alves, M. P., Srur, S. A., Junior, J. B., y Barbosa, M. I. (2018). Chemical characterization, nutritional aspects and antioxidant capacity of noni (*Morinda citrifolia* L) produced in northeastern Brazil. *International Food Research Journal*, 25(2), 870-875. [http://www.ifrj.upm.edu.my/25%20\(02\)%202018/\(58\).pdf](http://www.ifrj.upm.edu.my/25%20(02)%202018/(58).pdf)
- Nelson, S. C. (2001). Noni cultivation in Hawaii. *Fruits and Nuts*, 4, 1-4. https://www.ctahr.hawaii.edu/Noni/downloads/noni33_50.pdf
- Nelson, S. C. (2003). *Morinda citrifolia* L. *Permanent Agriculture Resources*, USA. <https://www.samento.com.ec/sciencelib/noni/nonioverview.pdf>
- Nelson, S. (2005). Noni seed handling and seedling production. *Fruits and Nuts*, 10, 1-4.
- Palu, A. K., West, B. J., y Jensen, C. J. (2012). Noni seed oil topical safety, efficacy, and potential mechanisms of action. *Journal of Cosmetics, Dermatological Sciences and Applications*, 2(2), 74-78. <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=20117>
- Pawlus, A., y Kinghorn, D. (2007). Review of the ethnobotany, chemistry, biological activity and safety of the botanical dietary supplement *Morinda citrifolia* (noni). *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 59(12), 1587-1609. <https://doi.org/10.1211/jpp.59.12.0001>
- Peter, P. I., y Peter, K. V. (2018). Noni (*Morinda citrifolia* L.): Research and Development. In *New Age Herbals*, (pp. 55-69). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8291-7_4
- Potterat, O., y Hamburger, M. (2007). *Morinda citrifolia* (Noni) fruit-phytochemistry, pharmacology, safety. *Planta Medica*, 73(03), 191-199. <https://doi.org/10.1055/s-2007-967115>
- Pratap, U. P., Priyanka, H. P., Ramanathan, K. R., Raman, V., Hima, L., y Thyagarajan, S. (2018). Noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit juice delays immunosenescence in the lymphocytes in lymph nodes of old F344 rats. *Journal of Integrative Medicine*, 16(3), 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2018.04.002>

- Rethinam, P., y Sivaraman, K. (2007). Noni (*Morinda citrifolia* L), the miracle fruit-A holistic review. *International Journal of Noni Research*, 2, 4-34.
- Rodríguez-Barahona, C. M., Corrales-García, J. E., Hernández-Montes, A., Ybarra-Moncada, M. C., y García-Mateos, M. R. (2015). Contenido fitoquímico de jugo de noni (*Morinda citrifolia*) microencapsulado en emulsiones W/O/W. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 26-30. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181643224025>
- Rodrigues, L. S., da Silva, A. R., y Macêdo, A. A. (2017). Noni (*Morinda citrifolia* Linn.): Determinação fitoquímica e potencial antioxidante pelo método DPPH. *Conexões-Ciência e Tecnologia*, 11(4), 47-54. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v11i4.921>
- Rosyida, V. T., Nisa, K., Hayati, S. N., Apriyana, W., Darsih, C., Indrianingsih, A. W., y Ratih, D. (2019). Physicochemical properties of noni fruit, yam root, rose petal, and betel leaf transparent soap and their antimicrobial activities. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 251(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/251/1/012024>
- Sánchez, N. G., Rivera, A. G., Fitz, P. A., Zapata, E. V., García, M. D., Flores, M. A., . . . Cortazar, M. G. (2019). Antibacterial activity of *Morinda citrifolia* Linneo seeds against methicillin-resistant *Staphylococcus spp.* *Microbial Pathogenesis*, 128, 347-353.
- Sánchez, A., y Rodríguez, I. C. (2017). Mortalidad de larvas de spodoptera frugiperda por efecto de extractos de fruto de *Morinda citrifolia* L.(noni). *Revista Boliviana de Química*, 34(5), 138-141. http://www.scielo.org.bo/pdf/rbq/v34n5/v34n5_a02.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (09 de enero de 2017). *Gobierno de México*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) (2020). *Informe Nacional Sobre el Estado de los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas*. México. 319 pp. Informe_Nacional_RFAA.pdf (www.gob.mx)
- Sharma, K., Pachauri, S. D., Khandelwal, K., Ahmad, H., Arya, A., Biala, P., . . . Dwivedi, A. K. (2016). Anticancer effects of extracts from the fruit of *Morinda citrifolia* (Noni) in breast cancer cell lines. *Drug Research*, 66(03), 141-147. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1555804>
- Singh, D. (2012). *Morinda citrifolia* L. (Noni): a review of the scientific validation for its nutritional and therapeutic properties. *Journal of Diabetes and Endocrinology*, 3(6), 77-91. <https://doi.org/10.5897/JDE10.006>
- Sousa, S. G., Oliveira, L. A., Magalhães, D., de Brito, T. V., Batista, J. A., Pereira, C. M., . . . Barbosa, A. L. (2018). Chemical structure and anti-inflammatory effect of polysaccharide extracted from *Morinda citrifolia* Linn (Noni). *Carbohydrate Polymers*, 197, 515-523. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.042>

- Stadlbauer, V., Fickert, P., Lackner, C., Schmerlaib, J., Krisper, P., Trauner, M., y Stauber, R. E. (2005). Hepatotoxicity of NONI juice: report of two cases. *World Journal of Gastroenterology: WJG*, 11(30), 4758. <https://doi.org/10.3748%2Fwjg.v11.i30.4758>
- Sullón, J. P. V. (2009). *Evaluación de la actividad antioxidante del noni (Morinda citrifolia L.) en tres estados de madurez en tingo maría* [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria de la Selva].
- Ulloa, J. A., Rosas, P., Ramírez, J. C., y Ulloa, B. E. (2012). El noni: propiedades, usos y aplicaciones potenciales. *Fuente*, 4(10), 44-49. <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/04-10/5.pdf>
- Valencia, M., Ancona, J., Reyes, J., García, M., y León, F. (2017). Evaluación de los metabolitos del Noni (*Morinda citrifolia*). *ReIbCi*, 4(4), 16-22.
- Wang, M., y Su, C. (2001). Cancer preventive effect of *Morinda citrifolia* (Noni). *Annals of the NY Academy of Science*, 952, 161-168. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2001.tb02737.x>
- Wang, Z., Dou, R., Yang, R., Cai, K., Li, C., y Li, W. (2021). Changes in phenols, polysaccharides and volatile profiles of Noni (*Morinda citrifolia* L.) juice during fermentation. *Molecules*, 26(9), 2604. <https://doi.org/10.3390/molecules26092604>
- West, B. J., Jensen, C. J., y Westendorf, J. (2006). Noni juice is not hepatotoxic. *World Journal of Gastroenterology: WJG*, 12(22), 3616. <https://doi.org/10.3748%2Fwjg.v12.i22.3616>
- West, B. J., Jarakae Jensen, C., y Westendorf, J. (2008). A new vegetable oil from noni (*Morinda citrifolia*) seeds. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(11), 1988-1992. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2008.01802.x>
- Yilmazer, N., Coskun, C., Gurel-Gurevin, E., Yaylim, I., Eraltan, E. H., y Ikitimur-Armutak, E. I. (2016). Antioxidant and anti-inflammatory activities of a commercial noni juice revealed by carrageenan-induced paw edema. *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 589-595. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0074>
- Zavala, L. G., Zacarías, J. D., Arredondo, C. K., y Telles, J. A. (2014). Obtención de *Morinda citrifolia* (noni) en polvo para su aplicación en la industria de alimentos (yogurt). In *1er. Simposio nacional de Investigación e Innovación en Ingeniería Química*, 100. https://www.researchgate.net/profile/Ma-Ba-11/publication/273521290_Modelacion_de_sistemas_biolgicos_usando_gpvs/links/55051b420cf231de0775f1f6/Modelacion-de-sistemas-biolgicos-usando-gpus.pdf#page=108
- Zhang, W. M., Wang, W., Zhang, J. J., Wang, Z. R., Wang, Y., Hao, W. J., y Huang, W. Y. (2016). Antibacterial constituents of hainan *Morinda citrifolia* (noni) leaves. *Journal of Food Science*, 81(5), M1192-M1196. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13302>

Capítulo 2

Valorización de proteínas vegetales de fuentes no convencionales

Valorization of plant protein from unconventional sources

¹Alejandro Martínez Velasco*

²César Alberto Roldán Cruz

³Daniel Trujillo Ramírez

Resumen

La búsqueda de novedosas fuentes de proteína para su aplicación en el desarrollo de alimentos más nutritivos y funcionales se está enfocando en el estudio y aprovechamiento de aquellas de origen vegetal, obtenidas de fuentes no convencionales, que sean más sustentables y económicamente accesibles, respecto a las de origen animal. Dentro de esta categoría destacan el haba (*Vicia faba*), amaranto (*Amaranthus*), huauzontle (*Chenopodium berlandieri*) y yaca (*Artocarpus heterophyllus*), de las cuales es posible obtener aislados proteicos de excelente calidad, con propiedades tecnológicas y funcionales que han permitido la comercialización formal de dichos aislados. Para ello, es necesario tener conocimiento de las propiedades nutricionales, la composición química y las propiedades funcionales de cada una de ellas, para definir el tratamiento físico, químico o enzimático más conveniente y las condiciones que permitan alcanzar el máximo rendimiento en su aplicación en diversas matrices, ya sea para la industria alimentaria, cosmética o farmacéutica. Esta revisión, que presenta las principales características fisicoquímicas y las áreas de oportunidad que tienen los aislados proteicos de diferentes fuentes vegetales no convencionales, busca mostrar que es posible el aprovechamiento sustentable de muchos recursos nativos y/o regionales, que se han abandonado o no se les ha

¹ CONACyT-Facultad de Nutrición, Universidad Veracruzana-Región Veracruz, Calle Carmen Serdán 5, Salvador Díaz Mirón, 91700, Veracruz, Ver., México.

² Facultad de Nutrición, Universidad Veracruzana-Región Veracruz, Calle Carmen Serdán 5, Salvador Díaz Mirón, 91700, Veracruz, Ver., México.

³ Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Blvd. E. Cárdenas González 1201 Pte. Col. Jardín Cd. Mante, Tam.

*Autor de correspondencia: alemave86@hotmail.com

dado la adecuada importancia económica y social, y que, sin embargo, representan recursos vegetales valiosos.

Palabras clave: Proteínas vegetales, fuentes no convencionales, alimentos funcionales, propiedades tecnológicas, sustentabilidad.

Summary

The search for novel protein sources for application in the development of more nutritious and functional foods is focusing on the study and use of those of plant origin, obtained from non-conventional sources that are more sustainable and economically accessible, with respect to the animals of origin. Within this category, we can highlight the importance of broad bean (*Vicia faba*), amaranth (*Amaranthus*), huauzontle (*Chenopodium berlandieri*), and jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*), from which it is possible to obtain excellent protein isolates, with technological and functional properties that have allowed the formal commercialization of said isolates. To do this, it is necessary to have knowledge of the nutritional properties, chemical composition, and functional properties of each of them, to define the most convenient physical, chemical, or enzymatic treatment and the conditions that allow for achieving maximum performance in its application in various applications matrices, whether for the food, cosmetic or pharmaceutical industry. This review, which presents the main physicochemical characteristics and the areas of opportunity that protein isolates from different non-conventional plant sources have, seeks to show if it is possible to make sustainable use of many native and/or regional resources, that have been abandoned. or they have not been given the correct economic and social importance, which, however, represent valuable plant resources.

Keywords: Vegetable proteins, unconventional sources, functional foods, technological properties, sustainability.

Introducción

La creciente preocupación de las personas por el cuidado de la salud y el consumo de alimentos más naturales, nutritivos y saludables, la sustentabilidad climática, aunado al encarecimiento de la canasta básica, producto de un fenómeno de inflación de alcance mundial, ha obligado a los gobiernos, instituciones de investigación e industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, a la búsqueda de alternativas de alimentos obtenidos a partir de fuentes regionales, no convencionales o poco valorizados (Jeganathan et al., 2023). Un grupo muy importante de alimentos está representado por las proteínas, principalmente de origen animal; sin embargo, hay un interés creciente hacia las proteínas de origen vegetal, las cuales presentan muchas ventajas, respecto de aquellas de origen animal. Dentro

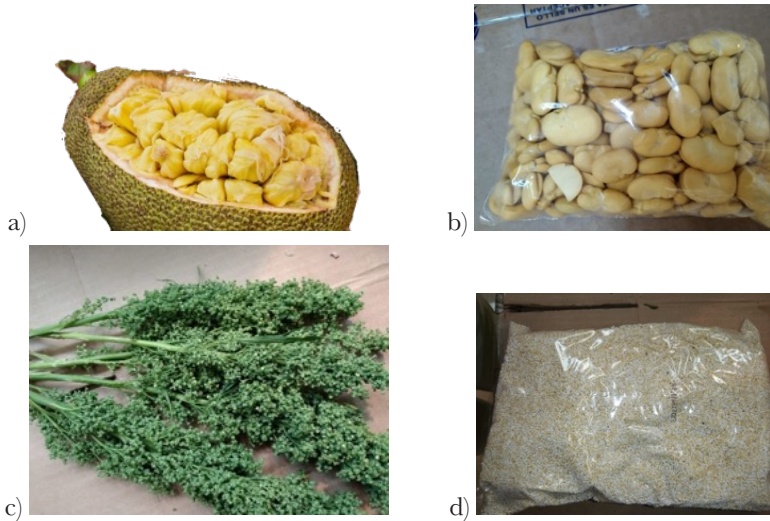
de ellas se incluyen: su biocompatibilidad, costos relativamente bajos, renovables y biodegradables, libres de hormonas y buen balance de aminoácidos hidrofílicos/lipofílicos (serina, prolina, glicina, ácido aspártico, ácido glutámico: isoleucina, leucina, fenilalanina, valina) (Nesterenko et al., 2013; López et al., 2018a; Dhull et al., 2022). Las fuentes convencionales de proteína vegetal incluyen principalmente a la soya, arroz, trigo (Han et al., 2015) y algunas leguminosas como frijol, lenteja y garbanzo (de Almeida Costa et al., 2006); sin embargo, existen otras alternativas que presentan altos contenidos de proteína, un mejor equilibrio de aminoácidos esenciales y propiedades funcionales mejoradas que incluyen la capacidad estabilizante, emulsificante, gelificante y espesante. Un mecanismo interesante de revalorizar estas fuentes es mediante el aislamiento de la proteína para obtener concentrados, aislados e hidrolizados proteicos, ya sea implementando métodos físicos, químicos o enzimáticos (López-Monterrubio et al., 2020; Martínez-Velasco et al., 2018). Además, para mejorar la funcionalidad de estas proteínas, incrementar su demanda y diversificar sus aplicaciones, se están implementando tecnologías verdes, emergentes y amigables para el medio ambiente. El propósito de este capítulo se enfoca en proporcionar información de las características fisicoquímicas, funcionales y la potencialidad de fuentes no convencionales o poco valorizadas, producidas en México para incentivar su desarrollo en productos alimentarios novedosos y nutritivos.

Fuentes no convencionales de proteína vegetal en México

En México se puede encontrar una amplia variedad de vegetales con alto contenido de proteínas con propiedades fisicoquímicas y tecnológicas que son de interés en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmetológica, como el haba (*Vicia faba* L.), amaranto (*Amaranthus* spp.), huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.) y yaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) (Figura 1).

Figura 1

(a) fruto de yaca (b) granos de haba (c) huauzontle y (d) amaranto



Fuente: fotografías tomadas por los autores.

Haba

El haba (*Vicia faba* L.) es la séptima leguminosa más importante en el mundo (Vioque et al., 2012; Pérez et al., 2014), pero en México la producción agrícola es baja, respecto a otros granos como el maíz, sorgo, arroz y frijol (SIAP, 2023). Martínez Velasco et al. (2018) utilizaron las semillas de haba endurecidas y las molieron hasta obtener una harina fina que tuvo un contenido de humedad de 8.20 ± 0.13 %, 26.83 ± 0.15 % de proteína y 0.26 ± 0.04 % de grasa. A partir de la harina desengrasada obtuvieron un aislado de proteína de haba que tuvo un contenido de humedad de 7.80 ± 0.06 y un contenido de proteína de 89.02 ± 1.01 %. Es destacable el contenido de proteína (26-28 %), ligeramente inferior al de la soya (37-38 %) (Corzo-Ríos et al., 2022). A pesar de ello, las habas se utilizan más como alimento destinado para consumo animal que humano, debido al gran aporte proteico que ofrece, por lo que existe gran interés en revalorizar este cultivo con la finalidad de obtener una proteína funcional que pueda ser utilizada para la elaboración de alimentos (Parmar et al., 2017). Sin embargo, existen muy pocos estudios sobre las propiedades funcionales de la proteína nativa de haba.

Recientemente, Jeganathan et al. (2023), estudiaron la proteína de haba, enfocándose en proponer métodos alternativos más limpios y amigables con el medio ambiente, utilizando el procesamiento húmedo suave y su efecto en el rendimiento, pureza y recuperación de concentrados o aislados proteicos de dos cultivares de haba, en la que el método con agua caliente (35 °C) + micelización fue el más efectivo y permitió obtener el mayor contenido de aminoácidos. En las propiedades espumantes, se ha encontrado que esta proteína tiene mejor estabilidad a pH 4 que a pH 2, 10 y 12 (Arogundade et al., 2006). La actividad emulsionante del aislado de proteína de haba nativo fue comparable a la de los aislados de proteína de soya y lentejas, pero menor que la del aislado de proteína de garbanzo. Martínez-Velasco et al. (2018), encontraron que es posible obtener un aislado de proteína a partir del grano de haba, cuyas características fisicoquímicas y funcionales pudieron ser mejoradas con ultrasonido de alta intensidad. También, en fracciones ricas en almidón y fibra se han evaluado a las proteínas respecto a sus propiedades de solubilidad, capacidad espumante y digestibilidad, encontrando que los carbohidratos tienen un efecto marcado sobre las propiedades tecnofuncionales de las proteínas (Krause et al., 2023). Más trabajos han sido reportados respecto a las propiedades tecnofuncionales de las proteínas de haba (Tabla 1). El haba es considerada como una fuente no convencional de proteína para consumo humano.

Tabla 1

Propiedades funcionales de la proteína de haba (Vicia faba L)

Título	Propiedad funcional	Referencia
Composition and functional properties of protein isolates obtained from commercial legumes grown in northern Spain.	Emulsificación	Fernández-Quintela et al. (1997)
Comparison of physicochemical properties of 7S and 11S globulins from pea, fava bean, cowpea, and french bean with those of soybean-french bean 7S globulin exhibits excellent properties.	Estabilidad térmica, emulsionante y solubilidad	Kimura et al. (2008)
Extraction of protein concentrates from faba beans.	Solubilidad	Sivasankari et al. (2019)
<i>Functional and Rheological Properties of Vicia faba L. Protein Isolates.</i>	Emulsificación, formación de espuma y viscosidad	Żmudziński et al. (2021)
<i>Effect of industrial process conditions of fava bean (Vicia faba L.) concentrates on physico-chemical and functional properties.</i>	Emulsificación y formación de espumas	Sharan et al. (2022)

Fuente: elaboración propia con información de autores citados.

Amaranto

El amaranto (*Amaranthus* spp.) ha sido cultivado desde hace 5000-7000 años como alimento básico por los aztecas, y recientemente se han explorado sus propiedades tecnofuncionales (Corke et al., 2016). La composición proximal realizada por Figueroa-González et al. (2022), en harina desengrasada de amaranto (*Amaranthus* spp) variedad Nutrisol (INIFAP), presentó un contenido de cenizas de $3.45 \pm 0.46\%$, $18.08 \pm 0.65\%$ de proteína, $0.42 \pm 0.05\%$ de grasa, $3.31 \pm 0.08\%$ de fibra y $73.50 \pm 0.63\%$ de carbohidratos, todos en base seca. Respecto al contenido de proteína en cereales como el trigo (11-15 %, Strong, 1982), el arroz (6-9 %, Shi et al., 2022), el amaranto representa valores relativamente altos (15-18 %, López et al., 2018), que presenta un equilibrio saludable de aminoácidos esenciales: histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, treonina, triptófano y valina (Procopet y Oroian, 2022). El consumo de amaranto y sus productos derivados ha sido impulsado por la demanda de alimentos funcionales saludables por parte de consumidores preocupados por la salud. La proteína del amaranto está compuesta básicamente por albúmina, globulina 7S, globulina 11S, globulina P y glutelina (Bolontrade et al., 2016). Su calidad es superior a la de las proteínas de cereales como el arroz, el trigo y el maíz (Das et al., 2021), siendo una excelente alternativa como complemento nutricional y para mejorar las propiedades estructurales, funcionales y nutricionales de los alimentos procesados.

Tabla 2

Propiedades funcionales de la proteína de amaranto (Amaranthus spp.)

Título	Propiedad funcional	Referencia
Foaming and structural studies on the acidic subunit of amaranth 11S globulin modified with antihypertensive peptides as a function of pH and ionic strength.	Formación de espuma y solubilidad	Aguilar Farrera et al. (2022)
Microencapsulation of betanin by complex coacervation of carboxymethylcellulose and amaranth protein isolate for application in edible gelatin films.	Formación de películas	Constantino y García Rojas, (2022)
Amaranth as a source of antihypertensive peptides.	Antihipertensivo	Nardo et al. (2020)
Structural and rheological properties of amaranth protein concentrate gels obtained by different processes.	Formación de geles	Bejarano-Luján et al. (2021)

Título	Propiedad funcional	Referencia
<i>Relationship between physicochemical and functional properties of amaranth (Amaranthus hypochondriacus) protein isolates</i>	Absorción de aceites, formación de espumas, estabilidad.	Shevkani et al. (2014)

Fuente: elaboración propia con información de autores citados.

Huauzontle

El huauzontle es el nombre con el que se conoce a *Chenopodium nuttalliae* Saff, una especie de planta comestible originaria de México. El nombre común se deriva del náhuatl *huautli* “amaranto” y *tzontli* “pelo”. Este pseudocereal se ha consumido tradicionalmente en México desde la época prehispánica (Kistler y Shapiro, 2011). El huauzontle, al igual que la quinua (*Chenopodium quinoa*), pertenece a la familia de las *Chenopodiaceae*, y ambos son libres de gluten, por lo que pueden ser consumidos por personas con enfermedad celíaca, además de que tienen una composición rica en nutrientes (Pereira et al., 2019). El huauzontle tiene un contenido proteico relativamente alto (aprox. 17 %), así como antioxidantes y almidón (Barrón-Yáñez et al., 2009). Además, las semillas de huauzontle representan un ingrediente potencialmente útil para la salud del consumidor, ya que son una buena fuente de compuestos fenólicos con alta actividad antioxidante (Lazo-Vélez et al., 2016). En la harina de las semillas de Huauzontle, el análisis proximal realizado indicó un contenido de cenizas de $5.7 \pm 0.2\%$, $20.4 \pm 0.3\%$ de proteína cruda, $10.0 \pm 0.1\%$ de grasa cruda, $3.6 \pm 0.1\%$ de fibra cruda y $60.4 \pm 0.1\%$ de carbohidratos (López-Monterrubio et al., 2020). También se han caracterizado las propiedades fisicoquímicas y funcionales del almidón de huauzontle (Assad-Bustillos et al., 2014). Tiene altos contenidos de la mayoría de los aminoácidos esenciales, excepto valina, y una digestibilidad de proteínas de $83.0 \pm 0.2\%$, con un peso molecular entre 20 y 50KDa, forman geles homogéneos, espumas estables y aumenta la viscosidad (López-Monterrubio et al., 2020). Se puede considerar al huauzontle como una fuente importante de proteínas, que también puede utilizarse como suplemento proteico de los alimentos básicos (Hernández-Marin et al., 2019).

Yaca

La yaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) es un fruto que se cultiva en México, particularmente en regiones tropicales (Reséndiz-Vázquez et al., 2017). Este fruto contiene bulbos comestibles con pulpa y semillas amarillas, que están encerrados en un arilo blanco que rodea un endospermo marrón delgado que cubre cotiledones blancos carnosos (Tran et al., 2015). Las semillas de la yaca, que representan del 8 al 15% del peso total de la fruta, normalmente se desechan, se cuecen al vapor

y se comen como refrigerio, o se usan en platos locales (Swami et al., 2012). Estas semillas tienen un contenido bastante alto de carbohidratos (67 %) y proteínas (20 %) (Lima et al., 2014; Tran et al., 2015). En las semillas de la yaca también se pueden encontrar dos componentes importantes llamados lectinas, que son la jacalina y artocarpina, las cuales tienen importantes propiedades antibacterianas, antifúngicas y anticancerígenas Swami et al. (2012). Rengsutthi et al. (2011), obtuvieron un aislado de proteína a partir de la semilla de la yaca con un contenido de proteína del 69.62 %, 0.72 % de grasa y 2.34 % de cenizas. Calderón-Chiu et al. (2021) obtuvieron un concentrado de proteína a partir de las hojas de la yaca, utilizando precipitación isoelectrica asistida con altas presiones hidrostáticas y encontraron valores de humedad de $3.61 \pm 0.53 \%$, $65.82 \pm 1.56 \%$ de proteína, $6.47 \pm 1.33 \%$ de lípidos, $10.03 \pm 0.29 \%$ de cenizas y 14.07 % de carbohidratos. Además, contiene aminoácidos como arginina, cistina, histidina, leucina, lisina, metionina, treonina y triptófano (Pavanasasivam et al., 1973).

Tabla 3

Propiedades funcionales de la proteína de yaca (Artocarpus heterophyllus Lam.)

Título	Propiedad funcional	Referencia
<i>Production, physico-chemical and functional characterization of a protein isolate from jackfruit (Artocarpus heterophyllus) seeds.</i>	Solubilidad de proteínas, actividad emulsionante, estabilidad de la emulsión, capacidad espumante y estabilidad.	Ulloa et al. (2017)
Physicochemical, structural, and functional properties of protein fractions and protein isolate from jackfruit seeds.	Actividad emulsionante y formación de espuma.	Wu et al. (2022)
Effect of pH on emulsification performance of a new functional protein from jackfruit seeds.	Actividad emulsionante, estabilidad y solubilidad .	Zhang et al. (2019)
Jackfruit Seeds Protein Isolate by Spray Drying Method: The Functional and Physicochemical Characteristics.	Formación de geles, capacidad de retención de agua, capacidad de retención de aceites, actividad emulsionante, formación de espumas.	Haque et al. (2020)

Fuente: elaboración propia con base en autores citados.

Determinación de la composición química de proteínas obtenidas de fuentes vegetales no convencionales

El conocimiento de la estructura química de las proteínas alimentarias proporciona información sobre la conformación molecular y, por lo tanto, de la posterior funcionalidad que tendrá la proteína, así como de su capacidad para interactuar con otros ingredientes alimentarios (López et al., 2018). Mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), Martínez-Velasco et al. (2018) encontraron que la estructura secundaria de los aislados de proteína de haba está compuesta por 12.4 % de agregados intra-moleculares (A2), 12.3 % de láminas- β anti-paralelas, 10.2 % de giros- β , 19.3 % de hélices- α , 39.3 % de láminas- β y 6.5 % de agregados intermoleculares (A1). Lo anterior, indica que esta proteína tiene un carácter altamente hidrofóbico y, de acuerdo con Carbonaro et al. (2015), puede tener un efecto negativo en determinaciones *in vitro* de digestibilidad de la proteína. Sin embargo, es posible mejorar esta condición, aplicando diferentes condiciones de ultrasonido de alta intensidad y altas presiones hidrostáticas. Mediciones electroforéticas realizada en esta proteína indican la presencia de bandas de proteína, localizadas alrededor de los 63 a 66 kDa (subunidades de convicilina), 46 a 60 kDa (subunidades de vicilina), 38 a 40 kDa y 20 a 23 kDa (subunidades de leguminosas) y 20 kDa y <15 kDa (polipéptidos de albúmina) (Warsame et al., 2018). Martínez-Velasco et al. (2018), también reportaron valores de tamaño de partícula de 369.4 ± 3.09 nm y potencial- ζ de 30.15 ± 0.31 mV.

Figuroa-González et al. (2022) encontraron que el contenido relativo de los componentes de la estructura secundaria del aislado de proteína de amaranto (variedad Nutrisol) fue de $67.1 \pm 0.2\%$ de láminas- β , $2.9 \pm 0.3\%$ de espirales aleatorias, $24.5 \pm 0.7\%$ de α -hélices y $5.4 \pm 0.5\%$ de giros- β , diámetro hidrodinámico de 1167.0 ± 15.6 nm y potencial- ζ de 19.6 ± 1.6 mV a pH 2 y -37.5 ± 1.5 mV a pH 10.0. Estos mismos autores encontraron que el aislado de la proteína de amaranto presentó bandas principales con pesos moleculares de ~ 54 kDa hasta ~ 17 kDa. La banda observada a ~ 37 kDa se relacionó a subunidades solubles de la globulina 7S (Barba de la Rosa et al., 2009). La globulina 11S se compone de una cadena ácida (~ 30 kDa) y una cadena básica (~ 22 kDa). Las albúminas presentes en el AP son vistas en las bandas con pesos moleculares aparentes de ~ 18 kDa (Barba de la Rosa et al., 2009).

Los aislados proteicos de huauzontle, en cuanto a características estructurales, tuvieron un $42.8 \pm 0.5\%$ de láminas- β , $35.2 \pm 0.4\%$ de α -hélices, $14.1 \pm 0.2\%$ de giros- β y $7.9 \pm 0.1\%$ de cadenas laterales. El potencial- ζ varió de $+12 \pm 1.0$ mV a pH 2.0 hasta -18.0 ± 0.3 mV a pH 6.0, con punto isoeléctrico a pH 3.6 (López-Monterrubio et al., 2020). En el perfil de aminoácidos, los aislados

proteicos de esta fuente vegetal, tuvieron altos contenidos de la mayoría de los aminoácidos esenciales, con excepción de la valina. Los valores obtenidos fueron superiores a los recomendados por la Food and Agriculture Organization of the United States/World Health Organization/United Nations University (FAO/WHO/UNU, 1985) para el consumo humano diario y a los reportados para otros pseudocereales como el amaranto y la quinua. Esta proteína tuvo una mayor proporción de aminoácidos hidrófobos (45.8 g/100g) en comparación con el contenido de aminoácidos hidrófilos (19.4 g/100g) (López et al., 2018), lo que podría incrementar las aplicaciones en las que se buscan las propiedades de superficie activa.

En el aislado de proteína de la semilla de la yaca, Reséndiz-Vázquez et al. (2017), encontraron que el perfil electroforético realizado presentó 7 clases principales de pesos moleculares, que son 26.82 kDa, 22.94 kDa, 21.52 kDa, 18.05 kDa, 15.85 kDa, 10.96 kDa y 6.08 kDa, los cuales conforman la estructura primaria de la proteína de este importante fruto.

Propiedades funcionales de las proteínas

De acuerdo con Guerrero et al. (2003), las propiedades funcionales de las proteínas se han definido como cualquier propiedad fisicoquímica, que afecta el comportamiento y las características de los alimentos en los cuales se encuentran o son agregadas y que contribuyen a la calidad final del alimento (sensorial, nutricional y química). La determinación de las propiedades funcionales de una proteína es importante para definir las condiciones bajo las cuales se puede lograr el máximo rendimiento en su aplicación en determinado sistema alimentario (Bolóntrade et al., 2013). Dentro de las más importantes, se consideran la solubilidad, capacidad espumante, capacidad y estabilidad emulsificante, así como su capacidad gelificante (Yu et al., 2017). Muchas de estas características serán influenciadas por la fuente vegetal de la que se obtenga, las condiciones de extracción de la proteína (cambios de pH, ultrasonido de alta intensidad, altas presiones hidrostáticas y microondas), propiedades estructurales y estabilidad al pH y a las altas temperaturas.

Los aislados proteicos fueron obtenidos de harina de haba desengrasada y posteriormente tratados con diferentes condiciones de temperatura y tiempo de ultrasonido de alta intensidad, con la finalidad de modificar sus características fisicoquímicas y mejorar sus propiedades funcionales (Martínez-Velasco et al., 2018). Lo anterior, permitió obtener una proteína con las condiciones óptimas, la cual tuvo una menor tensión superficial (48.16 ± 0.07 mN/m), esfuerzo de cedencia superior ($\tau_0 = 10.05 \pm 0.62$ Pa), mayor capacidad espumante (258.3%), mayor solubilidad (35.21 ± 0.58 %) tamaño de burbujas bajo ($d_{1,0}=190.0$ μ m), que permaneció sin

cambios después de 30 min, respecto a la proteína nativa (54.40 ± 0.20 mN/m, 4.98 Pa, 19.87 ± 1.62 % y 363.5 μ m, respectivamente) (Martínez-Velasco et al., 2018).

Por otro lado, el aislado de proteína de huauzontle presenta buena capacidad espumante a pH 7.0, la cual aumentó conforme se incrementó la concentración de proteína. Las espumas estuvieron formadas por burbujas de aire pequeñas y esféricas, las cuales permanecieron esféricas después de 60 minutos. El tamaño de las burbujas disminuyó (2.8 ± 0.6 μ m hasta 0.8 ± 0.2 μ m) conforme se incrementó la concentración de proteína, indicando una mayor estabilidad espumante (Monterrubio-López et al., 2020). Por otro lado, la capacidad espumante del aislado de proteína de amaranto tuvo valores de 203.5 ± 4.2 y 296.6 ± 3.7 % a pH 9.0 hasta 213.3 ± 3.1 y 310.0 ± 3.2 % a pH 5 (Figueroa-González et al., 2021), valores superiores a los presentados por los aislados de proteína de haba. Lo anterior, indica la amplia estabilidad que presenta la proteína de amaranto al pH, al mantener sin cambios significativos la capacidad espumante.

Los aislados proteicos obtenidos a partir de la yaca y tratados con ultrasonido mejoraron la capacidad de retención de aceite (3.22 gg^{-1} - 4.01 gg^{-1}), actividad (100% a pH 4.0, 6.0 y 8.0, 400W) y estabilidad emulsificante, capacidad espumante (289% - 301.2%, a pH 8.0), hidrofobicidad superficial (~ 140000 , 400W) y la solubilidad (~ 0.10 mg/mL), en comparación al control (251.3 %; 1.92 gg^{-1} ; 65 % a pH 4.0, 75 % a pH 6.0 y 80 % a pH 8.0, 400W; 90000; (~ 0.70 mg/mL, 200W; respectivamente) (Reséndiz-Vázquez et al., 2017). Por lo tanto, los aislados proteicos de la yaca podrían ayudar en la formación y estabilización de emulsiones alimentarias (Zhou et al., 2016).

Aplicaciones potenciales de las proteínas

Aislados proteicos obtenidos del huauzontle presentan un gran contenido de todos los aminoácidos esenciales, excepto valina (López-Monterrubio et al., 2020), incluso superior al de la proteína de amaranto. Además, su estabilidad en un rango amplio de pH asegura que los aislados de proteína de huauzontle pueden utilizarse como un ingrediente novedoso y versátil en el desarrollo de alimentos batidos y geles alimentarios (Monterrubio-López et al., 2020). Así también, aislados proteicos de proteínas de amaranto y haba, modificados mediante tratamientos combinados de cambios de pH (ácidos y alcalinos) y ultrasonido de alta intensidad, presentan un incremento en la capacidad y estabilidad espumante, lo cual abre la oportunidad para su utilización como agente espumante para el desarrollo e innovación de productos aireados, como panes, galletas, helados y *mousses*, ya que tendrían la capacidad de mantener la apariencia deseada de los alimentos durante más de 60

min (Xu et al., 2020), respecto a 17 min que logra estabilizar una espuma, utilizando albúmina de clara de huevo (1.5 g/mL) (Yi et al., 2013). Adicionalmente, debido a la capacidad mejorada de los aislados proteicos de las diferentes fuentes vegetales mencionados anteriormente, en cuanto a la disminución de la tensión superficial, cambios en estructura secundaria (diferente proporción de fracciones hidrofílicas e hidrofóbicas), carga eléctrica, tamaño de partícula y solubilidad, podrían utilizarse exitosamente como agentes emulsificantes naturales, ya sea para la estabilización de emulsiones, nano emulsiones, elaboración de geles o también como materia de pared para su aplicación en el diseño de micro y nano cápsulas para la retención y posterior liberación de compuestos bioactivos.

Conclusiones

La revalorización de fuentes no convencionales mediante la extracción de aislados proteicos de alta calidad, aprovechando frutos regionales como el haba, amaranto, huauzontle y yaca, ofrece una perspectiva interesante para el desarrollo de proyectos de producción, investigación e innovación encaminados al estudio, caracterización y aplicación de estas importantes fuentes de proteína. Es necesario el conocimiento de las características nutricionales, químicas y funcionales de las fuentes vegetales para diseñar las mejores alternativas de aprovechamiento, ya sea para fines de aplicación en la fortificación de alimentos, el desarrollo de productos novedosos y nutritivos o bien, su aplicación para el desarrollo de sistemas alimentarios más complejos como el desarrollo de emulsiones, nano emulsiones, complejos biopoliméricos, geles, micro y nano cápsulas. Para alcanzar estos objetivos y sobre todo que permitan obtener un beneficio integral, será necesaria la colaboración de los centros de investigación, instituciones de educación superior, instituciones gubernamentales, sector productivo y sector social.

Referencias

- Aguilar-Farrera, D., Morales-Camacho, J. I., Espinosa-Hernández, E., Benítez-Cardoza, C. G., Jara-Romero, G. J., y Luna-Suárez, S. (2022). Foaming and Structural Studies on the Acidic Subunit of Amaranth 11S Globulin Modified with Antihypertensive Peptides as a Function of pH and Ionic Strength. *Molecules*, 27(11), 3538. <https://doi.org/10.3390/molecules27113538>
- Arogundade, L.A., Tshay, M., Shumey, D., Manazie, S. (2016). Effect of ionic strength and/or pH on extractability and physico-functional characterization of broad bean (*Vicia faba* L.) protein concentrate. *Food Hydrocolloids*, 20, 1124-1134. .2005.12.010.
- Assad-Bustillos, M., Ramírez-Gilly, M., Tecante, A., y Chaires-Martínez, L. (2014). Physicochemical, functional, thermal and rheological characterization of starch

- from huauzontle seeds (*Chenopodium berlandieri* spp. *nuttalliae*). *Agrociencia*, 48(8), 789-803. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n8/v48n8a3.pdf>.
- Barba de la Rosa, A. P., Fomsgaard, I. S., Laursen, B., Mortensen, A. G., Olvera-Martínez, L., Silva-Sánchez, C., et al. (2009). Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as an alternative crop for sustainable food production: Phenolic acids and flavonoids with potential impact on its nutraceutical quality. *Journal of Cereal Science*, 49, 117-121. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.07.012>.
- Barrón-Yáñez, M. R., Villanueva-Verduzco, C., García-Mateos, M. R., y Colinas-León, M. T. (2009). Valor nutricional y contenido de saponinas en germinados de huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.), calabacita (*Cucurbita pepo* L.), canola (*Brassica napus* L.) y amaranto (*Amaranthus leucocarpus* S. Watson syn. *hypoch.* *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15, 237-243, 3. [http://refhub.elsevier.com/S0268-005X\(20\)30260-5/sref11](http://refhub.elsevier.com/S0268-005X(20)30260-5/sref11).
- Bejarano-Luján, D. L., Da Cunha, R. L., y Netto, F. M. (2010). Structural and rheological properties of amaranth protein concentrate gels obtained by different processes. *Food Hydrocolloids*, 24(6-7), 602-610. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.02.007>
- Bolontrade, A. J., Scilingo, A. A., y Añón, M. C. (2013). Amaranth proteins foaming properties: Adsorption kinetics and foam formation-Part 1. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 105, 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.12.039>.
- . (2016). Amaranth proteins foaming properties: Film rheology and foam stability-Part 2. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 141, 643-650. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.10.061>.
- Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Herman-Lara, E., Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021). Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam) leaf as a new source to obtain protein hydrolysates: Physicochemical characterization, techno-functional properties and antioxidant capacity. *Food Hydrocolloids*, 112, 106319. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106319>.
- Carbonaro, M., Maselli, P., Nucara, A. (2015). Structural aspects of legume proteins and nutraceutical properties. *Food Research International*, 76, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.007>.
- Chel-Guerrero, L. A., Corzo-Ríos, L., Betancur-Ancona, D. A. (2003). Estructura y propiedades funcionales de proteínas de leguminosas. *Revista de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 227, 34-43. <https://www.revistauniversitaria.uady.mx/pdf/227/ru2275.pdf>.
- Constantino, A. B. T., y García-Rojas, E. E. (2022). Microencapsulation of betanin by complex coacervation of carboxymethylcellulose and amaranth protein isolate for application in edible gelatin films. *Food Hydrocolloids*, 133, 107956. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107956>
- Corke, H., Cai, Y. Z., y Wu, H. X. (2016). Amaranth: Overview. In C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, y J. Faubion (Eds.), *Encyclopedia of food grains* (2nd ed., Vol. 1, pp. 287-296). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00032-2>.

- Corzo-Ríos, L. J., Jimenez-Martínez, C., Cid-Gallegos, M. S., Cardador-Martínez, A., Martínez-Herrera, J., Sanchez-Chino, X. M. (2022). Chemical and non-nutritional modification of faba bean (*Vicia faba*) due to the effect of roasting and boiling. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30, 100622. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100622>.
- Das, D., Mir, N. A., Chandra, N. K., y Singh, S. (2021). Combined effect of pH treatment and the extraction pH on the physicochemical, functional and rheological characteristics of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) seed protein isolates. *Food Chemistry*, 353, 129466. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129466>.
- De Almeida Costa, G. E., da Silva Queiroz-Monici, K., Reis, S. M. P. M., y de Oliveira, A. C. (2006). Chemical composition, dietary fibre and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food chemistry*, 94(3), 327-330. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.11.020>
- Dhull, S. B., Kidwai, M. K., Noor, R., Chawla, P., y Rose, P. K. (2022). A review of nutritional profile and processing of faba bean (*Vicia faba* L.). *Legume Science*, 4(3), e129. <https://doi.org/10.1002/leg3.129>
- Fernández-Quintela, A., Macarulla, M. T., Del Barrio, A. S., y Martínez, J. A. (1997). Composition and functional properties of protein isolates obtained from omercial legumes grown in northern Spain. *Plant Foods for Human Nutrition*, 51, 331-341. <https://doi.org/10.1023/A:1007936930354>
- Figueroa-González, J. J., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E. J., Aguirre-Mandujano, E., Álvarez-Ramírez, J., Martínez-Velasco, A. (2022). Modifying the structure, physicochemical properties, and foaming ability of amaranth protein by dual pH-shifting and ultrasound treatments. *LWT - Food Science & Technology* 153, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112561>.
- Han, S. W., Chee, K. M., y Cho, S. J. (2015). Nutritional quality of rice bran protein in comparison to animal and vegetable protein. *Food Chemistry*, 172, 766-769. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.127>.
- Haque, M. A., Akter, F., Rahman, H., y Baqui, M. A. (2020). Jackfruit seeds protein isolate by spray drying method: The functional and physicochemical characteristics. *Food and Nutrition Sciences*, 11(5), 355-374. 10.4236/fns.2020.115026
- Hernández-Marín, C. R., Guadarrama-Mendoza, P. C., Valadez-Blanco, R., Chen, B. K., y Diosady, L. L. (2019, November). Alkaline Extraction and Purification of Huauzontle (*Chenopodium berlandieri* subsp. *Nuttalliae*) Seed Proteins by Ultrafiltration Membranes. In *2019 IEEE International Conference on Applied Science and Advanced Technology (Icasat)* (pp. 1-6). IEEE. 10.1109/Icasat48251.2019.9069519_
- Jeganathan, B., Vasanthan, T., Temelli, F. (2023). Isolation of clean-label faba bean (*Vicia faba* L.) proteins: A comparative study of mild fractionation methods against traditional

- technologies. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 84, 103285. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103285>.
- Kimura, A., Fukuda, T., Zhang, M., Motoyama, S., Maruyama, N., y Utsumi, S. (2008). Comparison of Physicochemical Properties of 7S and 11S Globulins from Pea, Fava Bean, Cowpea, and French Bean with Those of Soybean French Bean 7S Globulin Exhibits Excellent Properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 10273-10279. <https://doi.org/10.1021/jf801721b>
- Kistler, L., y Shapiro, B. (2011). Ancient DNA confirms a local origin of domesticated chenopod in Eastern North America. *Journal of Archaeological Science*, 38(12), 3549-3554. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.08.023>.
- Krause, M., Sørensen, J. C., Petersen, I. L., Duque-Estrada, P., Cappello, C., Tlais, A. Z. A., ... y Zannini, E. (2023). Associating Compositional, Nutritional and Techno-Functional Characteristics of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Protein Isolates and Their Production Side-Streams with Potential Food Applications. *Foods*, 12(5), 919. <https://doi.org/10.3390/foods12050919>
- Lazo-Vélez, M. A., Guajardo-Flores, D., Mata-Ramírez, D., Gutiérrez-Urbe, J. A., y Serna-Saldivar, S. O. (2016). Characterization and quantitation of triterpenoid saponins in raw and sprouted *Chenopodium berlandieri* spp. (Huauzontle) grains subjected to germination with or without selenium stress conditions. *Journal of Food Science*, 81, C19-C26. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13174>.
- Lima, B. N. B., Lima, F. F., Tavares, M. I. B., Costa, A. M. M., Pierucci, A. P. T. R. (2014). Determination of the centesimal composition and characterization of flours from fruit sedes. *Food Chemistry*, 151, 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.036>.
- López, D. N., Galante, M., Robson, M., Boeris, V., y Spelzini, D. (2018a). Amaranth, quinoa and chia protein isolates: Physicochemical and structural properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.080>.
- López-Monterrubio, D. I., Lobato-Calleros, C., Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J. (2020). Huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* Saff.) protein: Composition, structure, physicochemical and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 108, 106043. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106043>.
- Martínez-Velasco, A., Lobato-Calleros, C., Hernández-Rodríguez B. E., Román-Guerrero, A., Alvarez-Ramirez J., Vernon-Carter, E. J. (2018). High intensity ultrasound treatment of faba bean (*Vicia faba* L.) protein: Effect on surface properties, foaming ability and structural changes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 44, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.007>.

- Nardo, A. E., Suárez, S., Quiroga, A. V., y Añón, M. C. (2020). Amaranth as a source of antihypertensive peptides. *Frontiers in Plant Science*, 11, 578631. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.578631>
- Nesterenko, A., Alric, I., Silvestre, F., y Durrieu, V. (2013). Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness. *Industrial Crops and Products*, 42, 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.035>.
- Parmar, N., Singh, N., Kaur, A., Viridi, A.S., Shevkani, K. (2017). Protein and microstructure evaluation of harder-to-cook and easy-to-cook grains from different kidney bean accessions, *LWT - Food Sci. Technol.* 79, 487-495, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.027>.
- Pavanasavim, G., Uvais, M., y Sultanbawa, S. (1973). Cycloartenyl acetate, cycloartenol and cycloartenone in the bark of *Artocarpus* species. *Phytochemistry*, 12(11), 2725-2726. 10.1016/0031-9422(73)85088-5
- Pereira, E., Encina-Zelada, C., Barros, L., Gonzales-Barron, U., Cadavez, V., y Ferreira, I. C. (2019). Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* Willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food. *Food Chemistry*, 280, 110-114. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.068>.
- Pérez, L. D. J., González, H. A., Franco, M. O., Rubí, A. M., Ramírez, D. J. F., Castañeda, V. A., Aquino, M. J. G. (2014). Application of multivariate methods to identify outstanding broad bean cultivars for the State of Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 265-278. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n2/v5n2a8.pdf>.
- Procopet, O., y Oroian, M. (2022). Amaranth seed polyphenol, fatty acid and amino acid profile. *Applied Sciences*, 12(4), 2181. <https://doi.org/10.3390/app12042181>
- Rengsutthi, K., y Charoenrein. S. (2011) Physico-chemical properties of jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) and its application as a thickener and stabilizer in chilli sauce. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1309-1313. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.019>.
- Reséndiz-Vázquez, J. A., Ulloa, J. A., Urías-Silvas, J. E., Bautista-Rosales, P. U., Ramírez-Ramírez, J. C., Rosas-Ulloa, P., González-Torres, L. (2017). Effect of high-intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate. *Ultrasonics Sonochemistry*, 37, 436-444. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2017.01.042>.
- Sharan, S., Zotzel, J., Stadtmüller, J., Bonerz, D., Aschoff, J., Olsen, K., ... y Orlien, V. (2022). Effect of industrial process conditions of fava bean (*Vicia faba* L.) concentrates on physico-chemical and functional properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 81, 103142. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103142>
- Shevkani, K., Singh, N., Rana, J. C., y Kaur, A. (2014). Relationship between physicochemical and functional properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) protein isolates.

- International Journal of Food Science & Technology*, 49(2), 541-550. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12335>
- Shi, S., Wang, E., Li, C., Cai, M., Cheng, B., Cao, C., y Jiang, Y. (2022). Use of protein content, amylose content, and RVA parameters to evaluate the taste quality of rice. *Frontiers in Nutrition*, 8, 758547. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.758547>
- Sivasankari, R., Hemalatha, G., Amutha, S., Murugan, M., Vanniarajan, C., y Uma Maheswari, T. (2019). Extraction of protein concentrates from faba beans. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3), 3430-3434.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023). *Resumen del Reporte mensual de escenarios de 18 productos agroalimentarios*. 2023. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/789380/DE_NUESTRA_COSECHA_ENERO_2023.pdf
- Strong, W. M. (1982). Effect of late application of nitrogen on the yield and protein content of wheat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 22(115), 54-61. doi.org/10.1071/EA9820054
- Swami, S.B., Thakor, N.J., Haldankar, P.M., Kalse, S.B. (2012). Jackfruit and its many functional components as related to human health: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11, 565-576. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00210.x>.
- Tran, P.L., Nguyen, D.H.D., Do, V.H., Kim, Y., Park, S., Yoo, S. Lee, S., Kim, Y. (2015) Physicochemical properties of native and partially gelatinized high-amylose jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) seed starch. *LWT - Food Science and Technology*, 62, 1091-1098. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.054>.
- Ulloa, J. A., Villalobos Barbosa, M. C., Resendiz Vazquez, J. A., Rosas Ulloa, P., Ramírez Ramírez, J. C., Silva Carrillo, Y., y González Torres, L. (2017). Production, physicochemical and functional characterization of a protein isolate from jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seeds. *CyTA-Journal of Food*, 15(4), 497-507. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1301554>
- Vioque, J., Alaiz, M., Girón-Calle, J. (2012). Nutritional and functional properties of Vicia faba protein isolates and related fractions. *Food Chemistry*, 132, 67-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.033>.
- Warsame, A. O., O'Sullivan, D. M., y Tosi, P. (2018). Seed storage proteins of faba bean (*Vicia faba* L): Current status and prospects for genetic improvement. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(48), 12617-12626. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04992>.
- Wu, J., Zhou, X., Zhou, L., Liu, W., Zhong, J., Zhang, Y., y Liu, C. (2022). Physicochemical, structural, and functional properties of protein fractions and protein isolate from jackfruit seeds. *Journal of Food Science*, 87(4), 1540-1551. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16104>

- Xu, Y., Yang, N., Yang, J., Hu, J., Zhang, K., Nishinari, K., et al. (2020). Protein/polysaccharide intramolecular electrostatic complex as superior food-grade foaming agent. *Food Hydrocolloids*, 105474. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105474>.
- Yi, L., Lakemond, C. M. M., Sagis, L. M. C., Eisner-Schadler, V., van Huis, A., y van Boekel, M. A. J. S. (2013). Extraction and characterisation of protein fractions from five insect species. *Food Chemistry*, 141, 3341-3348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.115>.
- Yu, M., Zeng, M., Qin, F., He, Z., y Chen, J. (2017). Physicochemical and functional properties of protein extracts from *Torreya grandis* seeds. *Food Chemistry*, 227, 453-460. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.114>.
- Zhang, Y., Zhou, X., Zhong, J., Tan, L., y Liu, C. (2019). Effect of pH on emulsification performance of a new functional protein from jackfruit seeds. *Food Hydrocolloids*, 93, 325-334. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.032>
- Żmudziński, D., Goik, U., y Ptasek, P. (2021). Functional and rheological properties of *Vicia faba* L. protein isolates. *Biomolecules*, 11(2), 178. <https://doi.org/10.3390/biom11020178>
- Zhou, M., Liu, J., Zhou, Y., Huang, X., Liu, F., Pan, S., y Hu, H. (2016). Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of soybean glycinin at different ionic strengths. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.007>.

Capítulo 3

Probióticos y prebióticos: usos y aplicaciones *Probiotics and prebiotics: use and applications*

José Alfredo del Ángel del Ángel

**Verónica Hernández Robledo*

Sebastián Contreras Castillo¹

Resumen

Ciertos microorganismos que se consumen vivos pueden proporcionar beneficios al consumidor. En la actualidad algunos alimentos se formulan con algunos de los microorganismos denominados probióticos. Estos probióticos tienen un efecto positivo en el sistema digestivo y pueden mejorar el estado de salud de quienes los usan; aunque se debe evitar el riesgo debido a consumo excesivo. Diversas especies de microorganismos han mostrado tener capacidades especiales que despiertan el interés por estudiarlos. En los últimos años se llevan a cabo diversas investigaciones para evaluar y seleccionar las mejores cepas para ser usadas y comercializadas como probióticos. Así mismo, se trabaja en aislar o sintetizar compuestos que tengan un efecto positivo en la salud al influir en el crecimiento y actividad microbiana en el sistema digestivo; estos compuestos son denominados prebióticos y actualmente se estudia la adición en diversos productos y alimentos.

Palabras clave: probiótico, prebiótico, salud, cepas, alimento funcional.

Abstract

Certain microorganisms that are consumed alive may provide benefits to the consumer. Currently some foods are formulated with some of the microorganisms' called probiotics. These probiotics have a positive effect on the digestive system and can improve the health of those who use them, although the risk due to excessive consumption should be avoided. Various species of microorganisms have shown to have special capacities that arouse interest in studying them. In recent years, various investigations have been carried out to evaluate and select the best strains to be used and marketed as probiotics. Likewise, work is being done to isolate or synthesize compounds that have a positive effect on health by influencing

¹ Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Blvd. E. Cárdenas González 1201 Pte. Col. Jardín Cd. Mante, Tamaulipas-México.

*Autor de correspondencia: vero.hernandez@docentes.uat.edu.mx

microbial growth and activity in the digestive system; these compounds are called prebiotics and their addition to various products and foods is currently being studied.

Keywords: probiotic, prebiotic, health, strains, functional food.

Introducción

Los probióticos

Los microorganismos vivos que son ingeridos en cantidades adecuadas para obtener beneficios en la salud se definen como probióticos, en cambio, no se consideran como tal a las sustancias que produce el microorganismo a pesar de tener efectos positivos en quien los consume. Algunos alimentos y otros productos pueden formularse con probióticos y comercializarse como alimentos funcionales, complementos alimenticios o medicamentos, estos productos se caracterizan por tener un efecto positivo en el proceso digestivo y coadyuvar en el alivio de algunas enfermedades (Garrote y Bonet, 2017; Kim, et al., 2019; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022); sin embargo, el consumo de estos productos conlleva el riesgo de que un microorganismo usado como probiótico invada el sistema y cause sepsis, tal suposición es basada en que actualmente existe gran cantidad de especies y cepas usadas comercialmente, además de un consumo masivo y desmedido incluso por personas sanas y en personas vulnerables como los pacientes inmunosuprimidos, con trasplantes o con alteraciones vasculares (Brunser, 2017; Gómez-López, 2019).

Beneficios del uso de probióticos en la salud

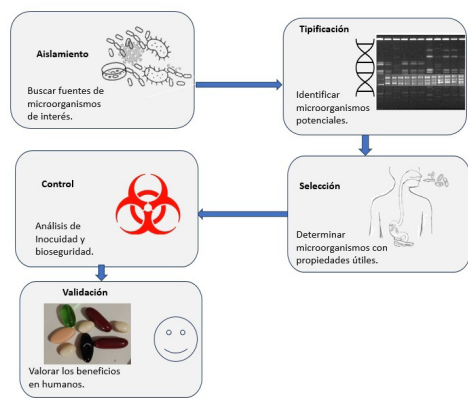
Si bien los beneficios de consumir algunas bacterias vivas se conocen desde hace siglos, recién se conoce que tanto consumidores como investigadores han puesto mucho interés en los probióticos, acrecentando la evidencia científica que muestra beneficios para la salud al consumirlos (Williams, 2010). Actualmente, se presentan trastornos metabólicos muy comunes como la dislipemia, obesidad, diabetes *mellitus* y síndrome metabólico, entre otros. Estos ocurren al interrumpir la ruta metabólica a causa de mala alimentación, mínima o nula actividad física y prolongados turnos de trabajo sedentario. El síndrome metabólico es un grupo de factores bioquímicos, genéticos, fisiológicos, metabólicos, obesidad, adiposidad visceral, intolerancia a glucosa, resistencia a insulina, triglicéridos altos, niveles bajos de glucosa, niveles de colesterol, hipertensión, riesgo de diabetes *mellitus* tipo 2, que están aunados a malos patrones dietéticos poco saludables y que son causantes del aumento al riesgo de mortalidad temprana (Bourebaba et al., 2022; López Jaramillo et al., 2013; Castro-Barquero et al., 2020).

La microbiota intestinal es un elemento clave en la regulación de las vías metabólicas de conversión de nutrientes a energía; se sabe que un desequilibrio en esta contribuye al desarrollo de resistencia a la insulina. Algunos estudios plantean que manipular la microbiota tiene un efecto en la disminución de peso o prevención de obesidad (Bourebaba et al., 2022). Los probióticos tienen efectos inmunomoduladores nutricionales; también ayudan en la prevención del estreñimiento, la diarrea, diversos trastornos intestinales y ayudan al sistema inmunológico (Kim et al., 2019).

El género *Bifidobacterium* constituye una parte importante de la microbiota de animales, de insectos y hasta mamíferos, siendo ampliamente utilizada por la industria alimentaria como probióticos. Algunas cepas tienen efectos beneficiosos específicos. Aunque los procesos moleculares que generan esas capacidades no se comprenden por completo; existen otras especies del género usadas como probióticos son *B. animalis*, *B. bifidum*, *B. breve*, *B. longum* (Sánchez et al., 2013). Las cepas probióticas que pertenecen a los géneros *Lactobacillus* tienen características que promueven la salud. Recientemente se investiga los efectos benéficos de los probióticos sobre el estrés oxidativo, también se estudian algunas cepas de *Lactobacillus acidophilus* y *Bifidobacterium Lactis* para evaluar el efecto que tienen sobre el nivel de glucosa en la sangre, otras especies importantes utilizadas como probióticos son *L. acidophilus*, *L. reuteri*, *L. rhamnosus*, *L. fermentum* (Rezazadeh, 2021). Algunas capacidades que tienen diversos microorganismos del género *Bifidobacterium* y *Lactobacillus* son ayudar al sistema inmune, facilitar la digestión y combatir algunas bacterias, por lo que estos probióticos tienen potencial para ser utilizados como parte de un nuevo método para tratar infecciones fúngicas, algunos estudios lo demuestran; por lo tanto, el empleo de probióticos puede abrir nuevas oportunidades para este tipo de tratamientos (Wu et al., 2022). Además, existen probióticos con propiedades antibacterianas, incluidos *Bifidobacterium*, *Lactobacillus rhamnosus*, *Saccaromyces boulardii* y *Saccharomyces cerevisiae*, que actualmente son temas de investigación. Algunos de estos microorganismos se localizan en la cavidad bucal y en el estómago y pueden actuar contra ciertas infecciones bacterianas (Markowiak y Śliżewska, 2017). En cambio, los probióticos usados para humanos y animales con efectos beneficiosos sobre la salud deben tener potencial probiótico. El aislamiento de las cepas que producen a estos se puede dar en el medio ambiente, en plantas o en animales, posteriormente se estudian sus características útiles. De las posibles cepas, se seleccionan y clasifican por la capacidad específica que tiene la cepa (Shokryazdan et al., 2017). En la Figura 1 se muestra el proceso de obtención de los probióticos.

Figura 1

Esquema de proceso de obtención de los probióticos



Fuente: elaboración propia.

Fuentes de obtención de probióticos

Los probióticos tienen mayor demanda en el mercado, debido a los múltiples beneficios en la salud y en la prevención de diversas enfermedades. De acuerdo con la literatura, los probióticos se encuentran en su mayoría en alimentos fermentados. En la Tabla 1 se muestran algunos ejemplos.

Tabla 1

Fuentes de probióticos, función y/o aplicación

Fuente	Tipo de probiótico	Función	País	Referencia
Frutas y verduras autóctonas fermentadas	Probióticos naturales (<i>L. plantarum</i> , <i>L. delbrueckii</i> , <i>L. paracasei</i> , <i>Weissella</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Streptococcus</i> , <i>Oenococcus</i> , <i>Pediococcus</i> y <i>Enterococcus</i>).	Mejorar la salud intestinal.	Malasia	Ajibola et al. (2023).
Bacterias Gram positivas (género <i>Streptomyces</i>)	Actinobacterias	Afecciones gastrointestinales.	Argentina	Cuozzo et al. (2023).
Kéfir de agua	Aislados bacterianos (<i>Lentilactobacillus hilgardii</i> y <i>L. buchneri</i> , y las levaduras (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>).	Nutrición de abejas y control de sus enfermedades.	Argentina	Rodríguez et al. (2023).

Fuente	Tipo de probiótico	Función	País	Referencia
Cereza negra fermentada	<i>Lactiplantibacillus plantarum</i> MYSAS1 y <i>Enterococcus faecium</i> MYSAS4	Influencia positiva en el tracto gastrointestinal de humanos y otros animales de consumo.	India	Divyashree et al. (2022).
Bebida <i>kanji</i> , <i>kanji</i> de arroz y lácteos comerciales	<i>Lactobacillus curvatus</i> , <i>mesenteroides</i> <i>Leuconostoc</i> , <i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp <i>lactis</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Lactobacillus delbrueckii</i> .	Actividad antimicrobiana contra seis patógenos transmitidos por alimentos.	Bangladesh	Paul et al. (2023).
Leche cruda de camello	<i>Lactobacillus fermentum</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus casei</i> , <i>Lactococcus lactis</i> subsp. <i>lactis</i> , <i>Enterococcus faecium</i> y <i>Streptococcus thermophilus</i>	No se analizan las propiedades funcionales de las cepas aisladas de la leche de camello.	Arabia Saudita	Shori (2017).

Fuente: elaboración propia con base en los autores citados.

Probióticos más utilizados en la industria alimentaria

La industria alimentaria se ve en la necesidad constante de innovar los productos alimenticios con la finalidad de ofrecer a los consumidores nuevas opciones que contribuyan de forma positiva en su salud. La Tabla 2 muestra algunos de los probióticos más utilizados en esta industria.

Tabla 2

Probióticos utilizados en la industria alimentaria

Tipo de probiótico	Función y tipo de alimento	Referencia
Probióticos microencapsulados	Alimentos funcionales y productos lácteos.	Reque y Brandelli (2021)
Cepas probióticas de <i>Lactobacillus</i>	Agente de biocontrol en alimentos contaminados con microorganismos patógenos.	Rodríguez et al. (2021)
Microorganismos probióticos formadores de esporas (<i>Bacillus</i>)	Mantener las características de alimentos y bebidas durante el almacenamiento de los alimentos a temperatura ambiente y en refrigeración.	Soares et al. (2023)

Tipo de probiótico	Función y tipo de alimento	Referencia
Probióticos (no especifica tipo)	Adición de probióticos a envases (recubrimiento y película comestible) para mejorar la vida útil de los alimentos.	Subramaniyan et al. (2023)
<i>Bacilo</i> termófilo	Por su estabilidad térmica puede ser incluida en productos fermentados, productos lácteos y de panificación.	Zhao et al. (2023)
Probióticos microencapsulados, películas comestibles y bacterias formadoras de esporas	Mejoran la vida útil protegiendo el producto de daños físicos, microbiológicos y químicos de barras de cereales, pan y pasteles mejorando la calidad de los alimentos.	Mani-López et al. (2023)
<i>Lactobacilli</i> y <i>Bifidobacteria</i>	Evaluación de técnicas que mejoren la supervivencia de bacterias probióticas en alimentos congelados.	Tyutkov et al. (2022)

Fuente: elaboración propia con base en los autores citados.

Prebióticos

En la actualidad hay interés en producir alimentos innovadores, seguros, nutritivos y con más vida útil, a la par también se busca que contengan compuestos bioactivos con un efecto positivo en la salud de los consumidores. Estos productos son llamados prebióticos, y se definen como las sustancias derivadas de alimentos que no son digeridos, pero que influyen en el crecimiento y la actividad de bacterias presentes naturalmente en el tracto digestivo (Gómez-López, 2019). Algunos prebióticos estimulan el crecimiento de bacterias intestinales autóctonas, con lo que pueden modificar la microbiota intestinal. Hay una extensa lista de vegetales que proporcionan componentes que podrían ser considerados prebióticos, sin embargo, algunos se producen artificialmente, como los galactooligosacáridos (Markowiak y Śliżewska, 2017).

En la Tabla 3 se muestran diversos estudios que evaluaron el efecto de prebióticos naturales sobre las propiedades y características sensoriales de algunos alimentos. Los compuestos bioactivos alimentarios se han convertido en una tendencia líder en las industrias de alimentos y envasados debido a la variedad de estructuras y funciones químicas y sus efectos beneficiosos sobre la salud y el bienestar de las personas.

Tabla 3

Efecto de prebióticos naturales como ingrediente funcional sobre las propiedades y características sensoriales de algunos alimentos

Prebiótico	Alimento	Compuesto bioactivo	Resultado	Referencia
Carbohidratos	Yogur	Inulina	La inulina mejoró la textura, el sabor, la sensación en la boca y viabilidad de <i>Saccharomyces boulardii</i> .	Sarwar, A. (2019)
Carbohidratos	Queso semiduro	Fructo-oligosacáridos (FOS)	Aumentó la actividad de <i>Lactobacillus paracasei</i> INIA P272 en queso durante la maduración.	Langa, S. (2019)
Carbohidratos	Pan	b-glucano	Pan con 1 % de b-glucano redujo el índice y carga glucémica del pan blanco.	Mohebbi, Z. (2019)
Carbohidratos	Néctar de mango	Inulina	La inulina mejoró la textura de néctar de mango sin sacarosa.	Alizadeh, A. (2019)
Carotenoide	Sopa instantánea	Luteína	Carotenogénesis durante 120 días de almacenamiento sin modificar los atributos sensoriales.	Pal, S., Bhattacharjee, P. (2019)
Flavonoide	Gelatina	Antocianina	La incorporación de microcápsulas recubiertas de inulina en gelatina proporcionó mayor protección a las antocianinas y mantuvo los parámetros de color de la gelatina durante todo el almacenamiento.	Bernardes, A. L. et al. (2019)
Flavonoide	Pan	Flavonoide	Los compuestos fueron estables durante el procesamiento de pan funcional por lo que se puede usar extracto de flavonoles de te negro en este producto.	Souza, M. C. et al. (2020)

Fuente: elaboración propia con información de autores citados.

Entre los compuestos bioactivos más estudiados se encuentra la fibra dietética, compuestos fenólicos, pigmentos naturales y péptidos bioactivos (obtenidos de frutas, verduras, cereales integrales, algas, pescados y microorganismos). Estos se utilizan para mejorar las propiedades organolépticas, sensoriales y de conservación, mientras que la última tendencia es incluir ingredientes funcionales con propiedades antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladoras. Además, hay otras aplicaciones emergentes de ingredientes bioactivos como flavonoides, carotenoides y prebióticos (Neri-Numa et al., 2020; Ya Lu et al., 2018). En tanto

los carbohidratos no digeribles como polisacáridos (almidón resistente, pectina y dextrina) y oligosacáridos como fructooligosacáridos, galactooligosacárido, lactulosa, inulina y otros se consideran componentes alimentarios con propiedades prebióticas. Actualmente con mejores métodos de síntesis y recuperación se pueden obtener diversos prebióticos. También se pueden sintetizar por reacciones químicas y bioquímicas (De Paulo Farias, De Araújo, Neri-Numa, 2019).

Conclusión

Tanto probióticos como prebióticos están en tendencia y tienen un impacto en la salud de las personas y en el procesamiento de alimentos, ambos van de la mano; los primeros al ser microorganismos que aportan beneficios a la salud de los consumidores, así como su participación en la prevención y mejoramiento de algunas enfermedades, su campo de aplicación se ha extendido gracias a diversos estudios de investigación que se han realizado con potencial aplicación en la industria alimentaria. En tanto que los prebióticos también aportan grandes beneficios al procesamiento de los alimentos, ya que mejoran en gran medida las propiedades de estos.

Referencias

- Ajibola, O. O., Thomas, R., y Bakare, B. F. (2023). Verduras y frutas autóctonas fermentadas seleccionadas de Malasia como fuentes potenciales de probióticos naturales para mejorar la salud intestinal. *Ciencia de los Alimentos y Bienestar Humano*, 12(5), 1493-1509.
- Alizadeh, A., Oskuyi, A. S., y Amjadi, S. (2019). The optimization of prebiotic sucrose-free mango nectar by response surface methodology: the effect of stevia and inulin on physicochemical and rheological properties. *Food Sci Technol*, 25, 243-251. <http://doi:10.1177/1082013218818016>
- Bernardes, A. L., Moreira, J. A., y Tostes M das, C. (2019). *In vitro* bioaccessibility of microencapsulated phenolic compounds of jussara (*Euterpe edulis* Martius) fruit and application in gelatine model-system. *LWT* (102), 173-180.
- Bourebaba, Y., Krzysztof, M., Malwina, M., y Lynda, B. (2022). Postbiotics as potential new therapeutic agents for metabolic. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 153, 113 138. <http://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113138>
- Brunser, O. (2017). Inocuidad, prevención y riesgos de los probióticos. *Revista Chilena de Pediatría*, 88(4), 534-540. <http://doi:10.4067/S0370-41062017000400015>
- Castro-Barquero, S., Ruiz-León, A. M., Sierra-Pérez, M., Estruch, R., y Casas, R. (2020). Dietary strategies for metabolic syndrome: a comprehensive review. *Nutrients*, 12(10), 2983. <http://doi:10.3390/nu12102983>

- Cuozzo, S., de LeBlanc, A. D. M., LeBlanc, J. G., Hoffmann, N., y Tortella, G. R. (2023). Género *Streptomyces* como fuente de probióticos y su potencial para su uso en la salud. *Investigación Microbiológica*, 266, 127248.
- de Paulo Farias, D., de Araújo, F. F., y Neri-Numa, I. (2019). Prebiotics: Trends in food, health, and technological applications. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 23-35. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.004>
- Divyashree, S., Anjali, P. G., Deepthi, B. V., Somashekaraiah, R., Mottawea, W., Hammami, R. y Sreenivasa, M. Y. (2022). La cereza negra como fuente de candidatos probióticos con actividad antimicrobiana y antibiopelícula contra Salmonella. *Revista Sudafricana de Botánica*, 150, 861-872.
- Garrote, A., y Bonet, R. (2017). Probióticos. *Farmacia Abierta*, 31(2), 13-16. <https://www.elsevier.es/es-revista-farmacia-profesional-3-pdf-X0213932417608720>
- Gómez-López, A. (2019). Microbioma, salud y enfermedad: probióticos, prebióticos y simbióticos. *Biomédica*, 39(4), 617-621. PMID: 31860173
- Kim, S., Guevarra, R., Kim, Y., Kwon, J., Kim, H., y Cho, J. (2019). Role of Probiotics in Human Gut Microbiome-Associated Diseases. *J. Microbiol. Biotechnol*, 29, 1335-1340. <http://doi:10.4014/jmb.1906.06064>
- Langa, S., van den Bulck, E., Peirotén, A., y Gaya, S. (2019). Application of lactobacilli and prebiotic oligosaccharides for the development of a synbiotic semihard cheese. *LWT*, 114, 108361. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108361>
- López Jaramillo, C., Castaño Mejía, A., Henao Velásquez, A., Restrepo Palacio, T. F., y Osorio Zuluaga, J. (2013). Síndrome metabólico y trastorno afectivo bipolar: una revisión de la literatura. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 42(3), 283-291. [http://doi:10.1016/S0034-7450\(13\)70021-0](http://doi:10.1016/S0034-7450(13)70021-0)
- Mani-López, E., Ramírez-Corona, N., y López-Malo, A. (2023). Avances en la incorporación de probióticos en alimentos horneados a base de cereales: estrategias, viabilidad y efectos: una revisión. *Investigación Aplicada en Alimentos*, 100330.
- Markowiak, P., y Śliżewska, K. (2017). Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on human health. *Nutrients*, 9(9), 1021. <http://doi:10.3390/nu9091021>
- Mohebbi, Z., Azizi-Lalabadi, M., y Hosseini, A. (2019). The effects of prebiotic bread containing oat β-glucan and resistant starch on the glycemic index and glycemic load in healthy individuals. *Nutr. Food Sci.* (49), 1029-1038. <http://doi.org/10.1108/NFS-10-2018-0292>
- Neri-Numa, I., Arruda, H., Geraldi, M., Junior, M., y Pastore, G. (2020). Natural prebiotic carbohydrates, carotenoids, and flavonoids as ingredients in food systems. *Current Opinion in Food Science*, 33, 98-107. <http://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.004>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *FAO*. <https://www.fao.org/home/es/>

- Pal, S., y Bhattacharjee, P. (2019). Lutein-fortified potato soup and freeze-dried lutein powder designed with supercritical carbon dioxide extract of yellow corn kernels are promising nutraceutical foods. *J. Food Process. Preserv.* (43), e14005. <http://doi.org/10.1111/jfpp.14005>
- Paul, C., Mishu, I. D., Miah, M. I., Bari, M. L., Rahman, S. R. y Malek, M. A. (2023). Aislamiento, identificación y potencial probiótico de bacterias ácido-lácticas y levaduras de yogurt comercial y alimento fermentado no lácteo casero “KANJI”. *Revista Internacional de Gastronomía y Ciencia de los Alimentos*, 100787.
- Reque, P. M. y Brandelli, A. (2021). Encapsulación de probióticos y nutraceuticos: Aplicaciones en la industria de alimentos funcionales. *Tendencias en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 114, 1-10.
- Rezazadeh, L., Alipour, B., Jafarabadi, M., Behrooz, M., y Gargari, B. (2021). Daily consumption effects of probiotic yogurt containing *Lactobacillus acidophilus* La5 and *Bifidobacterium lactis* Bb12 on oxidative stress in metabolic syndrome patients. *Clinical nutrition ESPEN*, 41, 136-142. <http://doi.org/10.1016/j.clnesp.2020.12.003>
- Rodríguez, M. A., Fernández, L. A., Díaz, M. L., Pérez, M., Corona, M., y Reynaldi, F. J. (2023). Caracterización microbiológica y química del kéfir de agua: una fuente innovadora de probióticos potenciales para la nutrición de las abejas. *Revista Argentina de Microbiología*, 55(2), 176-180.
- Rodríguez-Sánchez, S., Fernández-Pacheco, P., Seseña, S., Pintado, C., y Palop, M. L. (2021). Selección de cepas probióticas de *Lactobacillus* con actividad antimicrobiana para ser utilizadas como agentes de biocontrol en la industria alimentaria. *LWT*, 143, 111142.
- Sánchez, B., Ruiz, L., Gueimonde, M., Ruas-Madiedo, P., y Margolles, A. (2013). Adaptation of bifidobacteria to the gastrointestinal tract and functional consequences. *Pharmacological Research*, 69(1), 127-136. <http://doi.org/10.1016/j.phrs.2012.11.004>
- Sarwar, A., Aziz, T., Al-Dalali, S., Zhao, X., y Zhang, U. (2019). Physicochemical and microbiological properties of synbiotic yogurt made with probiotic yeast *Saccharomyces boulardii* in combination with inulin. *Foods*, 8, 468. <http://doi.org/10.3390/foods8100468>
- Shokryazdan, P., Faseleh Jahromi, M., Liang, J., y Ho, Y. (2017). Probiotics: From Isolation to Application. *Journal of the American College of Nutrition*, 666-676. <http://doi:10.1080/07315724.2017.1337529>
- Shori, A. B. (2017). La leche de camello y sus productos fermentados como fuente de posibles cepas probióticas y nuevos cultivos alimentarios: una mini reseña. *FarmaNutrición*, 5(3), 84-88.
- Soares, M. B., Almada, C. N., Pereira, E. P., Ferreira, B. M., Balthazar, C. F., Khorshidian, N., ... y Sant'Ana, A. S. (2023). Bacterias probióticas formadoras de esporas:

- características, beneficios para la salud y aspectos tecnológicos para sus aplicaciones en alimentos y bebidas. *Tendencias en Ciencia y Tecnología de los Alimentos*.
- Souza, M. C., Santos, M. P., Sumere, B. R., Silva, L. C. y Cunha, M. (2020). Isolation of gallic acid, caffeine and flavonols from black tea by on-line coupling of pressurized liquid extraction with an adsorbent for the production of functional bakery products. *LWT* (117), 108661. <http://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108661>
- Subramaniyan, V., Anitha, D. P. M., Sellamuthu, P. S. y Rotimi, S. E. (2023). Incorporación de probióticos en envases comestibles: una tendencia reciente en envases de alimentos. *Biocatálisis y Biotecnología Agrícola*, 102803.
- Tyutkov, N., Zhernyakova, A., Birchenko, A., Eminova, E., Nadtochii, L. y Baranenko, D. (2022). Viabilidad de los probióticos en productos alimenticios congelados. *Biociencia de los Alimentos*, 50, 101996.
- Williams, N. T. (15 de 03 de 2010). Probiotics. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 67(6), 449-458. <http://doi:10.2146/ajhp090168>
- Wu, Y., Hu, S., Wu, C., Gu, F. y Yang, Y. (2022). Probiotics: Potential Novel Therapeutics Against Fungal Infections. *Front. Cell. Infect. Microbiol.* 11, 793419. <http://doi.org/10.3389/fcimb.2021.793419>
- Yan, Y., Hu, Y. y Gänzle, M. (2018). Prebiotics, FODMAPs and dietary fiber-conflicting concepts in development of functional food products. *Food Science*, 20, 30-37. <http://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.02.009>

Capítulo 4

Endospermo del mango (*Mangifera indica*): fuente potencial para la obtención de almidón

Mango endosperm (Mangifera indica): potential source for obtaining starch

Guadalupe Bustos Vázquez

**Daniel Trujillo Ramírez*

Luz Andrea Castro Mendoza¹

Resumen

El endocarpio (semilla) del mango (*Mangifera indica*) representa entre el 20-60 % del peso de la fruta y de este entre el 45-75 % corresponde al endospermo (almendra) (ASM), dichos componentes generalmente se consideran como subproductos del procesamiento del mango, sin embargo, la ASM, puede considerarse como una alternativa potencial para la obtención de almidones, ya que contiene entre 32-78 % de carbohidratos y de estos se ha reportado que se puede obtener un rendimiento entre el 34 y 78 %, con una pureza del 99 %. El rendimiento del almidón va a depender de la variedad/cultivar del mango, así como de las características edafoclimáticas de su cultivo. Respecto a su digestibilidad, la ASM presenta del 76 al 80 % de almidón resistente (RS) superior a los reportados en maíz, pero con índice glucémico (49-51) inferiores a los de almidón de maíz, lo que puede indicar una digestibilidad beneficiosa cuando se consume el almidón de endospermo de mango. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo es dilucidar las características fisicoquímicas, morfoestructurales y funcionales que tiene el endospermo del mango y valorizar este subproducto como fuente potencial para la obtención de almidones y su posible utilización en la industria alimentaria.

Palabras clave: *Mangifera indica*, endospermo del mango, almidón, subproducto, valorización.

¹ Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Blvd. E. Cárdenas González 1201 Pte. Col. Jardín Cd. Mante, Tam.,

*Autor de correspondencia: daniel.trujillo@uat.edu.mx

Summary

The endocarp (seed) of mango (*Mangifera indica*) represents between 20-60 % of the weight of the fruit and of this between 45-75 % corresponds to the endosperm (kernel) (ASM), these components are generally considered as by-products of mango processing, however, ASM can be regarded as a potential alternative for obtaining starches, since it contains between 32-78 % carbohydrates, and from these, it has been reported that a yield between 34 and 78 % can be obtained, with purity than 99 %. Starch yield will depend on the mango variety/cultivar, as well as the edaphoclimatic characteristics of its cultivation. Regarding its digestibility, the ASM presents 76-80 % resistant starch (RS) higher than those reported in corn, but glycemic index (49-51) lower than those of corn starch, which may indicate beneficial digestibility when consumed. mango endosperm starch. Therefore, the objective of this chapter is to elucidate the physicochemical, morphostructural, and functional characteristics of the mango endosperm and to value this byproduct as a potential source for obtaining starches and their possible use in the food industry.

Keywords: *Mangifera indica*, mango endosperm, starch, by-product, valorization.

Introducción

La industria de procesamiento de alimentos genera anualmente alrededor de 100 millones de toneladas de desechos y subproductos de alimentos tan solo en la Unión Europea, lo que representa más del 35 % de las pérdidas (Marić et al., 2020). La industria de bebidas genera alrededor del 26 %, seguida de la industria láctea 21.3 %, y finalmente, la producción y procesamiento de frutas y verduras (obtención de jugos, extracción de pulpa y conservación a través de mermeladas y pulpa congelada) con el 14.8 %. Estas tres industrias, producen las mayores cantidades de residuos alimentarios (Arshadi et al., 2016; Baiano, 2014). En México, el escenario no es tan alentador, ya que, de acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), tan solo en los supermercados se desperdician aproximadamente 20 millones de toneladas de alimentos cada año, de las cuales casi 4.6 millones de toneladas correspondieron a desperdicios de leche, 2.9 millones de toneladas a tortillas, mientras que la naranja y el mango 1.4 millones de toneladas, siendo estas frutas las que más se desperdician (Statista, 2018).

Los desechos de las frutas incluyen piel, pulpa, desechos de semillas y orujo; estos subproductos podrían tener un enorme potencial para la obtención de ingredientes funcionales (Granato et al., 2017). Por ejemplo, la valorización se lleva a cabo mediante la obtención de almidones a partir de fuentes poco exploradas -además de las fuentes convencionales que incluyen a los cereales y tubérculos-, que puedan ser empleadas en la industria alimentaria para atender la creciente demanda del mercado

y obtener almidones con propiedades fisicoquímicas, estructurales y funcionales diferentes a las de las fuentes de almidón convencionales (Kringel et al., 2020).

Los almidones se han utilizado en diferentes segmentos industriales, como alimentos, papel, textiles, productos farmacéuticos, cosméticos, adhesivos y alimentación animal (Bojarczuk et al., 2020; Mwaurah et al., 2020). Actúan como agentes espesantes, de textura, aportan volumen, poder de hinchamiento y solubilidad. Estructuralmente, son unidades de glucosa que están unidas por enlaces α -1,4 o α -1,6, su estructura es sumamente compleja, lo cual, en turno, depende muchas veces de la fuente de obtención, el mecanismo y las condiciones de extracción, convirtiéndolo en un biomaterial versátil de especial interés debido a su abundancia, bajo costo, propiedades no tóxicas (no es carcinogénico, citotóxico o indica algún potencial neurotóxico) y biodegradabilidad para diversas industrias alimentarias y no alimentarias.

El mango (*Mangifera indica*), es la segunda fruta más consumida a nivel mundial, sin embargo, durante el procesamiento, para la obtención de pulpa (mesocarpio), la cáscara (exocarpio) y la semilla (endocarpio y endospermo) se desechan, lo que representa entre un 15-20% y 20-60%, respectivamente, de subproductos de esta fruta (Nicolas-García et al., 2023). El endospermo (denominado almendra) puede ser utilizado como fuente de nutrientes por el embrión durante la germinación, y este está constituido principalmente de almidón. Por esta razón, el objetivo de este capítulo es dilucidar las características fisicoquímicas, morfoestructurales, y funcionales que tiene el endospermo del mango, y valorizar este subproducto como fuente de obtención de almidones y su posible utilización en la industria alimentaria y no alimentaria.

Clasificación del almidón

De acuerdo con la digestibilidad del almidón (liberación y absorción de glucosa en el tracto gastrointestinal), este se puede clasificar en:

- Almidón de digestión rápida (*Rapidly Digestible Starch*; por sus siglas en inglés): es el almidón que se digiere completa y rápidamente en el intestino delgado por acción de las enzimas y es absorbido en el torrente sanguíneo dentro de los 20 minutos de la digestión *in vitro*, provocando un aumento de la glucosa plasmática posprandial.
- Almidón de digestión lenta (*Slowly Digestible Starch*) (SDS, por sus siglas en inglés): es la cantidad de almidón que se puede digerir por completo en 20 minutos a 120 minutos (Englyst et al., 1992); se digiere lenta y completamente en el intestino grueso y se asocia con el aumento tanto de los niveles de insulina como de la glucosa plasmática posprandial.

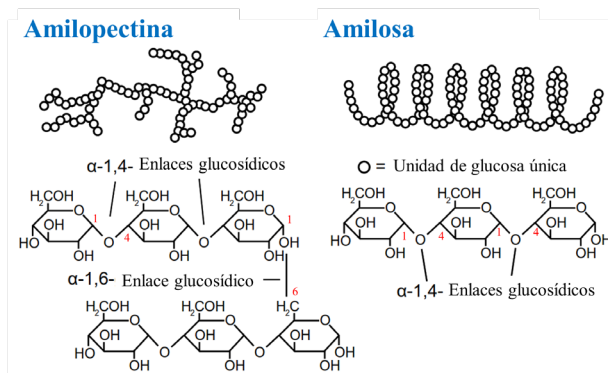
- Almidón resistente (*Resistant Starch*) (RS, por sus siglas en inglés): se refiere al almidón que no puede ser digerido en 120 min en el intestino delgado y por lo tanto pasa al intestino grueso, donde puede actuar como sustrato en los procesos de fermentación intestinal (Englyst et al., 1992; Bello-Perez et al., 2020).

Estructura química

El almidón, constituye una de las fuentes de almacenamiento de energía primaria de la mayoría de las plantas, es el segundo polisacárido más abundante en la tierra después de la celulosa y la principal fuente de energía en la dieta humana. Los gránulos de almidón están constituidos por dos poliglucanos: la amilosa y la amilopectina. La estructura molecular de la amilosa es, en comparación, simple, ya que consiste en residuos de glucosa conectados a través de enlaces α -(1,4) a cadenas largas con algunas ramificaciones en enlaces α -(1,6). Mientras que la amilopectina, es el componente principal, tiene la misma estructura básica, pero tiene cadenas considerablemente más cortas y muchas ramificaciones en los enlaces α -(1,6) (Bertoft, 2017) (Figura 1).

Figura 1

Estructura de la amilosa y amilopectina como constituyentes de la molécula de almidón



Fuente: adaptada de Willfahrt et al. (2019).

Aunque se suele considerar que la amilosa es lineal y que las moléculas de amilosa ramificada contienen pocas ramificaciones, tanto la amilosa ramificada como la lineal tienen cadenas largas con varios cientos o incluso miles de unidades de glucosilo (Takeda et al., 1987; Hizukuri et al., 1989), mientras que la amilopectina está muy ramificada y tiene comparativamente cadenas cortas (Bertoft et al., 2008;

Seung y Smith, 2019). Las ramificaciones de la amilopectina constituyen alrededor del 5 % de la molécula, lo que da como resultado una estructura molecular muy compleja. Las cadenas cortas de amilopectina forman dobles hélices, que cristalizan y contribuyen a la naturaleza semicristalina de los gránulos de almidón (Pfister et al., 2020). En la mayoría de los gránulos de almidón “normales”, la amilopectina constituye el componente principal en peso, mientras que la amilosa se compone del 15 al 30 % (Cuadro 1); sin embargo, existen muchas excepciones, por ejemplo, los almidones cerosos, llamados así por la apariencia del endospermo en los cereales cerosos, que contienen muy poca o ninguna amilosa, mientras que los almidones modificados genéticamente pueden contener entre un 50 y un 80 % de amilosa (Bertotf, 2017).

Tabla 1

Contenido de amilosa de algunas fuentes de almidones convencionales y no convencionales

Fuente vegetal	Amilosa (%)	Referencia
Hojas		
Arabidopsis	6-12	Zeeman et al. (2002); Seung et al. (2015)
Tabaco (<i>Nicotiana</i> spp.)	16-20	Matheson (1996)
Cereales		
Maíz (<i>Zea mays</i>)	22-30	Espinosa-Solís et al. (2009); Zhang et al. (2022)
Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	6-28	Wang et al. (2019); Zhang et al. (2019b)
Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	25-29	Chen et al. (2016)
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)	8-22	Islamovic et al. (2013)
Raíces y tubérculos		
Yuca (<i>Manihot esculenta</i>)	18-20	Ceballos et al. (2007); Bull et al. (2018)
Papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	17-21	Blennow et al. (2020)
Frutas		
Plátano (<i>Musa</i> spp.)	34-43	Li et al. (2022)
Endospermo del mango (<i>Mangifera indica</i>)	25	Ferreira et al. (2019); Silva et al. (2019)
Semilla de litchi (<i>Litchi chinensis</i>)	20-45	Thory y Sandhu (2017); Morales-Trejo et al. (2022); Zhang et al. (2022)
Kiwi (<i>Actinidia chinensis</i>)	35-52	Li y Zhu (2017)
Tallo de la piña (<i>Ananas comosus</i>)	34	Nakthong et al. (2017)
Semillas de yaca (<i>Artocarpus heterophyllus</i>)	22-38	Zhang et al. (2019a)

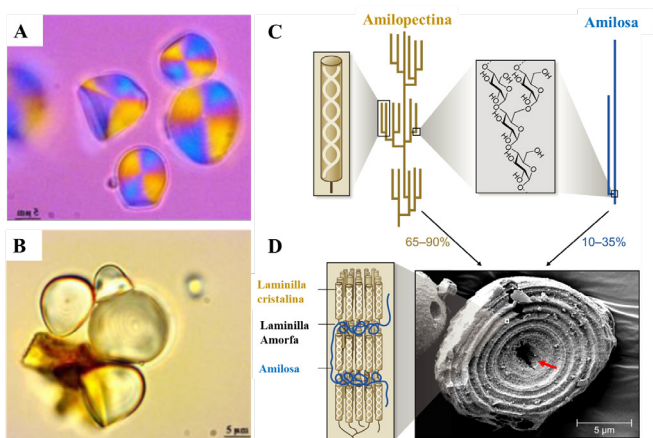
Fuente: elaboración propia.

Morfología

Los gránulos de almidón se pueden observar en microscopio óptico con luz polarizada, donde normalmente se ve una “cruz de Malta” extendiendo los brazos desde el llamado hilio, que se cree que es el origen del crecimiento del gránulo (Ambigaipalan et al., 2011). Este patrón de birrefringencia muestra que las moléculas, o una gran parte de las moléculas, están dispuestas de forma radial y sugiere un alto grado de orden dentro de los gránulos (Figura 2). En la Figura 2A se puede observar la “cruz de Malta” de almidones de semilla de litchi (*Litchi chinensis*) (Morales-Trejo et al., 2022), que es indicativa de una organización radial dentro del gránulo de almidón. La estructura de la amilosa es principalmente lineal y tiene muy pocas ramificaciones, sin embargo, la estructura ramificada de la amilopectina permite que las cadenas adyacentes formen hélices dobles que se empaquetan en laminillas cristalinas, mientras que los puntos de ramificación residen en laminillas amorfas (Figura 2C). Laminillas alternas cristalinas y amorfas dan lugar a la matriz de gránulos de almidón semicristalino. En la Figura 2D se muestra una micrografía electrónica de barrido de un gránulo de almidón de papa roto y parcialmente digerido (adaptado de Seung y Smith, 2019) donde se observan grandes anillos de crecimiento (cada uno con muchas laminillas alternas cristalinas/amorfas), en un modelo hipotético (poliédrico), en el que las moléculas de amilosa (líneas azules) se intercalan entre las moléculas de amilopectina.

Figura 2

Gránulos de almidón de litchi (*Litchi chinensis*)



Nota: los gránulos son observados con microscopio de luz polarizada (A) y en un microscopio óptico (B) (adaptada de Morales-Trejo et al., 2022). Arquitectura molecular y constituyente de los gránulos

de almidón (adaptado de Seung, 2020) (C). Microscopía electrónica de barrido del gránulo del endospermo de maíz que se ha abierto y digerido parcialmente con enzimas para revelar los anillos de crecimiento y la ubicación de un hilio central (indicado con una flecha roja) (D) (adaptado de Seung y Smith, 2019).

Métodos de extracción

Los gránulos de almidón presentes en las raíces, tubérculos y semillas están incrustados en fibras celulósicas y se mantienen unidos por sustratos de pectina (Rahman y Rakshit, 2004). El proceso de extracción del almidón de raíces y tubérculos consiste en rallar la materia prima, y en el caso de semillas triturarlas (hasta obtener harinas) con el fin de romper las células vegetales y liberar el almidón (Daiuto et al., 2005; Morales-Trejo et al., 2022). El éxito de la extracción de los almidones depende de la ruptura completa de las paredes celulares y, por lo tanto, de la liberación de los gránulos de almidón (Bergthaller et al., 1999).

Convencionales

Los métodos de extracción afectan la pureza, las características estructurales y la actividad biológica del almidón. La mayoría de los métodos de extracción de almidón a partir de fuentes no convencionales se limitan al método tradicional de extracción acuosa con álcali, que requiere mucho tiempo, más impurezas (gránulos con proteínas y lípidos residuales) (Li y Zhu, 2017; Salgado-Ordosgoitia et al., 2018). Con la extracción alcalina con hidróxido de sodio (NaOH), dimetilsulfóxido (DMSO) y metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), se obtienen mayores rendimientos, sin embargo, los gránulos de almidón contienen bajos niveles de proteína y lípidos residuales (Falade y Okafor, 2015; Jiang et al., 2013), además de generar efluentes indeseables a lo largo del proceso cuyo tratamiento y posterior remoción incrementan los costos de dicho proceso (Villareal et al., 2013), como ocurre con el almidón de yuca (*Manihot esculenta*), donde la concentración de cianuros en agua utilizada para lavar el almidón, después del proceso de extracción, es elevada, del orden del 40 al 70 % del cianuro total (Torres et al., 2003; Arguedas y Cooke, 2007). Con el fin de no utilizar una cantidad considerable de agua durante la extracción del almidón y evitar que se generen aguas residuales altamente orgánicas y ácidas, se puede utilizar la molienda en seco para conservar agua y reducir los residuos, indagar en métodos de extracción alternativos (como se detallan en el siguiente apartado), y/o utilizar diseños experimentales como la metodología de superficie de respuesta que optimicen las condiciones (temperatura, tiempo, pH) del proceso de obtención de almidón y de esta manera evitar la sobreutilización de los recursos.

El aislamiento de almidón mediante enzimas se produce cuando la celulosa, así como las hemicelulosas (componentes estructurales de la célula vegetal), se descompone (hidroliza) por la acción de enzimas tales como celulasas, pectinasas y xilanasas en el granulo de almidón (Sit et al., 2015). Con el aislamiento enzimático del almidón se puede obtener, mayor rendimiento, las condiciones de operación pueden ser a temperaturas de hasta 100 °C, pH de 3-10 y presión atmosférica moderada, sin embargo, el aislamiento implica tiempos más prolongados (más de 24 h) para la eliminación de proteínas y fibras y la liberación de almidón, lo cual no solo incrementa los costos de capital e intensifican los problemas microbianos, sino que también requieren el uso de sustancias conservantes en su mayoría tóxicas (Villareal et al., 2013; Sit et al., 2015).

Emergentes

El tratamiento con ultrasonido es uno de los métodos físicos empleados para extraer y modificar almidón a partir de diferentes fuentes y con ello mejorar sus propiedades funcionales (Wang et al., 2022). El rendimiento y los cambios en la estructura y las propiedades del almidón depende de la configuración de la frecuencia, la intensidad, el tiempo y los ciclos del ultrasonido, además de la temperatura y el contenido de humedad del sistema, así como del tipo de almidón (Morales-Trejo et al., 2022). Teóricamente, las ondas ultrasónicas (en el rango de frecuencia de 20 a 100 kHz con una intensidad de sonido de 10 a 1000 W), producen el fenómeno de cavitación, lo que produce el colapso de las burbujas, creando una alta presión localizada que rompe las membranas celulares y hace que la pared celular se rompa. Por otro lado, las burbujas cavitantes estables que interactúan con el campo acústico generan microflujos fuertes y un alto cizallamiento, lo que resulta en una fractura de la cadena macromolecular, reducción del enredo molecular, destrucción de la estructura cristalina, lo que provoca cambios en los enlaces de hidrógeno originales y la estructura de doble hélice de los gránulos de almidón. Estos efectos y cambios influyen en las propiedades morfológicas, estructurales, fisicoquímicas y digestivas del almidón (Gaquere-Parker et al., 2018; Morales Trejo et al., 2022; Wang et al., 2022).

Se ha demostrado que la extracción ultrasónica y la extracción enzimática pueden acortar significativamente el tiempo de extracción, reducir el consumo de energía y aumentar la tasa de extracción, por lo que, se consideran métodos de extracción de almidón ecológicos y eficientes (Lin et al., 2020). El método enzimático asistido por ultrasonido se ha aplicado para la extracción de almidón de la palmera del azúcar (*Arenga pinnata*) (Zhang et al., 2020) y el almidón de semilla de loto (*Nelumbo nucifera*) (Lin et al., 2020). Así, la selección del método de extracción se limita a obtener

un producto puro con el máximo rendimiento y recuperación, el menor costo y la menor cantidad de efluentes, sin afectar la estructura nativa del gránulo y con la mínima incidencia en sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas o toxicológicas (Correia y Beirao-da-Costa, 2012; Tester et al., 2008; Villareal et al., 2013).

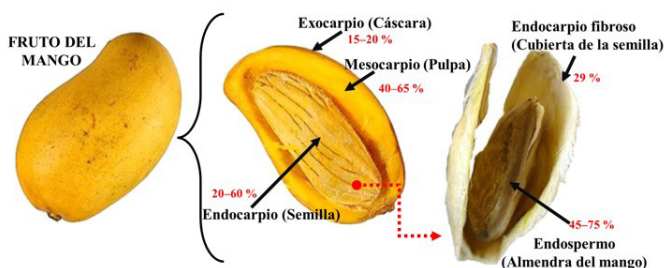
Endospermo (almendra) del mango (*Mangifera indica*)

Características generales

El mango (*Mangifera indica* L.) pertenece a la familia Anacardiaceae y es una fruta comercialmente valiosa y cultivada en todo el mundo, siendo la segunda fruta tropical más cultivada y consumida en el mundo (Ke et al., 2022). Según datos de la FAO en 2020, la producción mundial de mango fue de 54.83 millones de toneladas, siendo India el principal país productor y México posicionándose en 4to lugar de producción, pero el primero en exportación (García-Mahecha et al., 2023). Con la expansión continua del mercado de consumo, la forma de consumo del mango se ha transformado, involucrando periodos prolongados de transporte en cadena de frío, lo cual, en turno, produce la descomposición y el deterioro de la calidad del mango causados por la maduración poscosecha y el envejecimiento durante el almacenamiento y el transporte, lo que genera grandes pérdidas económicas (Liu et al., 2023). Durante el procesamiento se generan entre el 30 y el 60 % de residuos provenientes del mango, incluida la cáscara (15-20 %) y la semilla (20-60 %), como se muestra en la Figura 3 (García-Mahecha et al., 2023; Nicolás-García et al., 2023; Lim et al., 2019; Mwaurah et al., 2020; Sánchez-Camargo et al., 2021), generando un problema de contaminación industrial y ambiental.

Figura 3

Composición porcentual de los subproductos presentes en el mango (*Mangifera indica*)



Fuente: adaptada de Choudhary et al. (2023) y Nicolás-García et al. (2023).

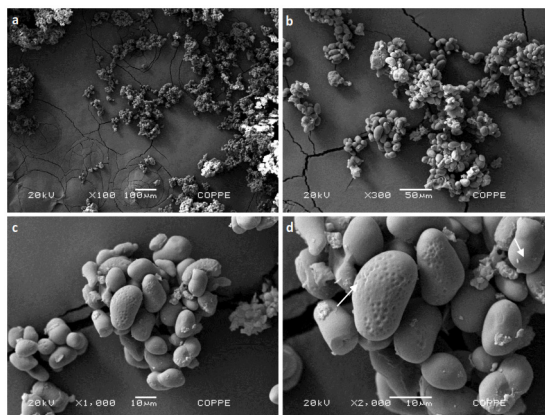
Se ha reportado, que los subproductos generados del procesamiento de mangos, como la cáscara y la semilla, son una fuente de nutrientes y compuestos bioactivos. Por ejemplo, la semilla de mango contiene entre 58-80 % de carbohidratos, del 6-13 % de proteínas con altos niveles de aminoácidos esenciales, minerales 2.1 %, fibra cruda 0.5 % y entre 6-16 g/100 g de lípidos con contenido de ácido oleico, linoleico y esteárico, lo cual, en turno, mejora su estabilidad oxidativa (García-Mahecha et al., 2023; Borrás-Enríquez et al., 2021; Lebaka et al., 2021; Torres-León et al., 2016; Gómez-Maldonado et al., 2020). Los principales compuestos fenólicos encontrados en extractos de almendra de mango Manila, provenientes de Michoacán, México, fueron mangiferina (17.89 mg/g), ácido clorogénico (6.88 mg/g), miricetina (4.94 mg/g), ácido ferúlico (4.49 mg/g), quercetina (3.87 mg/g), rutina (2.95 mg/g) y ácido cafeico (2.04 mg/g). Mientras que la capacidad antioxidante fue de 838.0 ± 20.0 μmol equivalentes/g de Trolox (Gómez-Maldonado et al., 2020).

Usos y aplicaciones

El alto contenido de carbohidratos en el endospermo del mango podría aprovecharse para la producción de almidón para diversas aplicaciones (Sandhu y Lim, 2008; Kaur et al., 2004). Ferraz et al. (2019) aislaron el almidón de mango a partir de harina de endospermo de mango variedad Ubá, proveniente de Brasil, con un rendimiento del 78.42 % y una pureza del 99.3 %. El protocolo de extracción se llevó a cabo en una solución de bisulfito de sodio (NaHSO_3) al 0.16 %, durante 16 h. El alto grado de purificación del almidón se puede atribuir a tres lavados con agua realizados en el método del aislado del almidón. Se ha observado que los lípidos de la almendra del mango se eliminan durante el proceso de extracción; por lo tanto, el paso de desengrasado no es necesario para la extracción del almidón, al menos en este componente del fruto. Los gránulos de almidón de mango varían de forma ovalada a elíptica, a diferencia de otros almidones como el maíz y el arroz, que presentan forma angular. Se pueden observar algunas hendiduras en los gránulos de almidón de mango, posiblemente causadas por un crecimiento no uniforme dentro del gránulo de almidón, o por colapsos promovidos por el secado, similares a las observadas en las morfologías de otras frutas, incluidas la manzana y la yuca. Los gránulos de almidón de mango se consideran pequeños, similares a los gránulos de almidón de maíz, con un tamaño promedio de $19.32 \mu\text{m}$ (Figura 5) (Espinosa-Solis et al., 2009; Ferraz et al., 2019).

Figura 4

Microscopía electrónica de barrido del almidón de endospermo de mango. a) 100×, b) 300×, c) 1000× y d) 2000×



Fuente: Ferraz et al. (2019).

Ferraz et al. (2019) reportan un contenido de amilosa del $36.61 \pm 0.35\%$ para mango variedad Ubá proveniente de Brasil, mientras que Espinosa-Solis et al. (2009) informan que para cultivar “Tommy Atkins” proveniente de México, un contenido de amilosa de 31.1% , por lo que el contenido de amilosa, puede variar entre diferentes cultivares, este bajo contenido de amilosa y alto contenido de amilopectina de cadena ramificada corta, en adición al bajo contenido de lípidos, es quizás el motivo por el cual este tipo de almidón presentaba menor porcentaje de retrodegradación en comparación con los almidones de plátano y maíz (Espinosa-Solis et al., 2009).

El almidón de endospermo de mango exhibe la viscosidad máxima a una temperatura más baja que otros almidones. Por lo tanto, este almidón podría aplicarse en alimentos que requieran altas viscosidades de pasta a temperaturas más bajas. Respecto a los estudios de digestibilidad, Sandhu y Lim (2008), reportan que los gránulos de almidón de endospermo de mango de los cultivares Chausa y Kuppi provenientes de Corea, son resistentes a la digestión, ya que exhiben mayores contenidos de almidón resistente (RS) ($75.6\text{-}80.0\%$), que aquellos encontrados en almidón de maíz (27.3%); sin embargo, el almidón de endospermo de mango, presenta valores de almidón de digestión rápida (RDS) de $4.7\text{-}5.2\%$ y de almidón de digestión lenta (SDS) de $15.3\text{-}19.2\%$, estos valores menores a los reportados por almidón de maíz (27.4% y 45.3% , respectivamente), esto aunado a que el almidón de semilla de mango presenta valores de índice glucémico más bajos ($48.8\text{-}50.9$) que el almidón de maíz (74.8), lo que indica su comportamiento de digestibilidad

beneficioso. Resultados similares de digestibilidad han sido reportados recientemente por Patiño-Rodríguez et al. (2020) para almidones de pulpa y cáscara de mango del cultivar Ataulfo, proveniente de México, con valores de RS de 19.5 y 35.2 %, respectivamente, de SDS de 21.30 % para pulpa y de 16.17 % para cáscara, y valores de RDS de 59.12 % y 48.6 % para pulpa y cáscara; sin embargo, la cocción aumenta la digestibilidad del almidón, ya que durante este proceso, la amilosa y la amilopectina se vuelven a asociar para formar un gel de almidón a través de un proceso irreversible que, en general, mejora la digestibilidad.

Conclusión

Los residuos del endocarpio del mango pueden ser una alternativa potencial para la obtención de almidón, debido a la gran cantidad de carbohidratos que contiene. Las características fisicoquímicas, de rendimiento y microestructurales dependen de los cultivares/variedades propias de cada región, además del método de aislamiento; y es en este último, donde se puede incrementar y modular el rendimiento, utilizando técnicas novedosas como la extracción asistida por ultrasonidos, la utilización de ácidos orgánicos o una combinación de estas, para así generar un impacto menos negativo en el ambiente en el proceso de extracción del almidón de almendra de mango. En comparación con los almidones de maíz y plátano, el almidón de almendra de mango exhibe alta viscosidad a temperaturas bajas, constituye una buena fuente alterna de obtención de almidón resistente (RS), por lo que son resistentes a la digestión; sin embargo, para incrementar la digestibilidad, se somete a cocción la matriz alimentaria que contiene almidón (como ocurre con pastas, productos de panificación). En adición, el almidón de almendra de mango presenta bajo índice glucémico, por lo que su digestibilidad en la salud humana es beneficiosa. Además de su obtención y aislamiento, el almidón de almendra de mango puede representar una fuente adicional de ingreso a los productores que cultivan este fruto y disminuir los problemas ambientales generados por este subproducto y con la información presentada en este capítulo, revalorizarlo.

Referencias

- Ambigaipalan, P., Hoover, R., Donner, E., Liu, Q., Jaiswal, S., ... et al. y Seetharaman, K. (2011). Structure of faba bean, black bean and pinto bean starches at different levels of granule organization and their physicochemical properties. *Food Research International*, 44(9), 2962-2974. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.006>
- Arguedas, P. y Cooke, R. D. (2007). Residual cyanide concentrations during the extraction of cassava starch. *International Journal of Food Science & Technology*, 17(2), 251-252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb00>

- Arshadi, M., Attard, T. M., Lukasik, R. M., Brnčić, M., Da Costa Lopes, A. M., ... et al. y Yuste-Córdoba, F. J. (2016). Pre-treatment and extraction techniques for recovery of added value compounds from wastes throughout the agri-food chain. *Green Chemistry*, 18(23), 6160-6204. <https://doi.org/10.1039/C6GC01389A>
- Baiano, A. (2014). Recovery of biomolecules from food wastes - A review. *Molecules*, 19(9), 515 14821-14842. <https://doi.org/10.3390/molecules190914821>
- Bello-Perez, L. A., Flores-Silva, P. C., Agama-Acevedo, E. y Tovar, J. (2020). Starch digestibility: Past, present, and future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14), 5009-5016. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8955>
- Bergthaller, W., Witt, W. y Goldau, H-P. (199). Potato starch technology. *Starch-Stärke*, 51(7), 235-242. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-379X\(199907\)51:7<235::AIDSTAR235>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-379X(199907)51:7<235::AIDSTAR235>3.0.CO;2-7)
- Bertoft, E. (2017). Understanding starch structure: Recent progress. *Agronomy*, 7(3), 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy7030056>
- Bertoft, E., Piyachomkwan, K., Chatakanonda, P. y Sriroth, K. (2008). Internal unit chain composition in amylopectins. *Carbohydrate Polymers*, 74(3), 527-543. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.04.011>
- Blennow, A., Skryhan, K., Tanackovic, V., Krunić, S. L., Shaik, S. S., ... et al. y Nielsen, K. L. (2020). Non-GMO potato lines, synthesizing increased amylose and resistant starch, are mainly deficient in isoamylase debranching enzyme. *Plant Biotechnology Journal*, 18(10), 2096-2108. <https://doi.org/10.1111/pbi.13367>
- Bojarczuk, A., Skąpska, S., Khaneghah, A. M. y Marszałek, K. (2022). Health benefits of resistant starch: A review of the literatura. *Journal of Functional Foods*, 93, 105094. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105094>
- Borrás-Enríquez, A. J., Reyes-Ventura, E., Villanueva-Rodríguez, S. J. y Moreno-Vilet, L. (2021). Effect of ultrasound-assisted extraction parameters on total polyphenols and its antioxidant activity from mango residues (*Mangifera indica* L. var. Manililla). *Separations*, 8(7), 94. <https://doi.org/10.3390/separations8070094>
- Bull, S. E., Seung, D., Chanez, C., Mehta, D., Kuon, J.-E., ... et al. y Gruissem, W. (2018). Accelerated ex situ breeding of GBSS- and PTST1-edited cassava for modified starch. *Science Advances*, 4: eaat6086. /doi/10.1126/science.aav6316
- Ceballos, H., Sánchez, T., Morante, N., Fregene, M., Dufour, D., ... et al. y Mestres, C. (2007). Discovery of an amylose-free starch mutant in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(18), 7469-7476. <https://doi.org/10.1021/jf070633y>
- Chen, G. X., Zhou, J. W., Liu, Y. L., Lu, X. B., Han, C. X., ... et al. y Yan, Y. M. (2016). Biosynthesis and Regulation of Wheat Amylose and Amylopectin from Proteomic and Phosphoproteomic Characterization of Granule-binding Proteins. *Scientific Reports*, 6, 33111. <https://doi.org/10.1038/srep33111>

- Choudhary, P., Devi, T. B., Tushir, S., Kasana, R. C., Popatrao, D. S. y Narsaiah, K. (2023). Mango Seed Kernel: A Bountiful Source of Nutritional and Bioactive Compounds. *Food and Bioprocess Technology*, 16, 289-312 <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02889-y>
- Correia, P. R. y Beirao-da-Costa, M. L. (2012). Starch isolation from chestnut and acorn flours through alkaline and enzymatic methods. *Food and Bioproducts Processing*, 90(2), 309-316. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.06.005>
- Daiuto, É., Cereda, M., Sarmiento, S. y Vilpoux, O. (2005). Effects of extraction methods on yam (*Dioscorea alata*) starch characteristics. *Starch-Stärke*, 57(3-4), 153-160. <https://doi.org/10.1002/star.200400324>
- Englyst, H. N., Kingman, S. M. y Cummings, J. H. (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(2), 33-50. [https://doi.org/10.1016/S0271-5317\(97\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0271-5317(97)00010-9)
- Espinosa-Solis, V., Jane, J-I. y Bello-Perez, L. A. (2009). Physicochemical Characteristics of Starches from Unripe Fruits of Mango and Banana. *Starch/Stärke*, 61(5), 291-299. <https://doi.org/10.1002/star.200800103>
- Falade, K. O. y Okafor, C. A. (2015). Physical, functional, and pasting properties of flours from corms of two Cocoyam (*Colocasia esculenta* and *Xanthosoma sagittifolium*) cultivars. *Journal of food science and technology*, 52(6), 3440-3448. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1368-9>
- FAO. (2020). *FAOSTAT. Food and Agricultural Commodities Production*. Food and Agricultural Organization of the United Nations-FAO, Rome.
- Ferraz, C. A., Fontes, R. L. S., Gizele C., Fontes-Sant'Ana, G. C. Calado, V., ... y Rocha-Leão, M. H. M. (2019). Extraction, Modification, and Chemical, Thermal and Morphological. Characterization of Starch From the Agro-Industrial Residue of Mango (*Mangifera indica* L) var. Ubá. *Starch/Stärke*, 71(1-2) 1800023. <https://doi.org/10.1002/star.201800023>
- Ferreira, S., Araujo, T., Souza, N., Rodrigues, L., Lisboa, H. M., ... Rocha, A. P. (2019). Physicochemical, morphological and antioxidant properties of spray-dried mango kernel starch. *Journal of Agriculture and Food Research*, 1, 100012.
- Gaquere-Parker, A., Taylor, T., Hutson, R., Rizzo, A., Folds, A., ... y Arruda, A. (2018). Low frequency ultrasonic-assisted hydrolysis of starch in the presence of α -amylase. *Ultrasonics sonochemistry*, 41, 404-409. <https://doi.org/10.1016/j.ultronch.2017.10.007>
- García-Mahecha, M., Soto-Valdez, H., Carvajal-Millan, E., Madera-Santana, T. J., Lomelí-Ramírez, M. G., y Colín-Chávez, C. (2023). Bioactive Compounds in Extracts from the Agro-Industrial Waste of Mango. *Molecules*, 28(1), 458. <https://doi.org/10.3390/molecules28010458>

- Gómez-Maldonado, D., Lobato-Calleros, C., Aguirre-Mandujano, E., Leyva-Mir, S. G., Robles-Yerena, L. y Vernon-Carter, E. J. (2020). Antifungal activity of mango kernel polyphenols on mango fruit infected by anthracnose. *LWT-Food Science and Technology*, 126, 109337. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109337>
- Granato, D., Nunes, D. S. y Barba, F. J. (2017). An integrated strategy between food chemistry, biology, nutrition, pharmacology, and statistics in the development of functional foods: A proposal. *Trends in Food Science y Technology*, 62, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.010>
- Hizukuri, S., Takeda, Y., Maruta, N. y Juliano, B. O. (1989). Molecular structure of rice starch. *Carbohydrate Research*, 189, 227-235. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(89\)84099-6](https://doi.org/10.1016/0008-6215(89)84099-6)
- Islamovic, E., Obert, D. E., Oliver, R. E., Harrison, S. A., Ibrahim, A., ... y Jackson, E. W. (2013). Genetic dissection of grain beta-glucan and amylose content in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Molecular Breeding*, 31, 15-25. <https://doi.org/10.1007/s11032-012-9764-1>
- Jiang, Q., Gao, W., Shi, Y., Li, X., Wang, H... et al. y Xiao, P. (2013). Physicochemical properties and *in vitro* digestion of starches from different *Dioscorea* plants. *Food Hydrocolloids*, 32(2), 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.02.001>
- Kaur, M., Singh, N., Sandhu, K. Singh, y Guraya, H. Singh. (2004). Physicochemical, morphological, thermal and rheological properties of starches separated from kernels of some Indian mango cultivars (*Mangifera indica* L.). *Food Chemistry*, 85(1), 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.06.013>
- Ke, Y., Dai, T., Xiao, M., Chen, M., Liang, R., ... y Deng, L. (2022). Industry-scale microfluidizer system produced whole mango juice: Effect on the physical properties, microstructure and pectin properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102887. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102887>
- Kringel, D. H., El Halal, S. L. M., da Rosa Zavareze, E. y Guerra Dias, A. R. (2020). Methods for the Extraction of Roots, Tubers, Pulses, Pseudocereals, and Other Unconventional Starches Sources: A Review. *Starch-Stärke*, 72(11-12). 1900234. <https://doi.org/10.1002/star.201900234>
- Lebaka, V. R., Wee, Y.-J., Ye, W. y Korivi, M. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds in three different parts of mango fruit. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 741. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020741>
- Li, B., Xie, B., Liu, J., Chen, X., Zhang, Y., ... y Huang, Ch. (2022). A study of starch resources with high-amylose content from five Chinese mutant banana species. *Frontiers in Nutrition*, 9, 2296. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1073368>
- Li, D. y Zhu, F. (2017). Physicochemical properties of kiwifruit starch. *Food Chemistry*, 220, 129-136. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.192>

- Lim, K. J. A., Cabajar, A. A., Lobarbio, C. F. Y., Taboada, E. B. y Lacks, D. J. (2019). Extraction of bioactive compounds from mango (*Mangifera indica* L. var. Carabao) seed kernel with ethanol-water binary solvent systems. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2536-2544. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03732-7>
- Lin, X., Sun, S., Wang, B., Zheng, B. y Guo, Z. (2020). Structural and physicochemical properties of lotus seed starch nanoparticles prepared using ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105199. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105199>
- Liu, B., Xin, Q., Zhang, M., Chen, J., Lu, Q., ... y Sun, J. (2023). Research Progress on Mango Post-Harvest Ripening Physiology and the Regulatory Technologies. *Foods*, 12(1), 173. <https://doi.org/10.3390/foods12010173>
- Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M. y Brnčić, S. R. (2018). An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by products: Ultrasound, microwaves, and enzyme assisted extraction. *Trends in Food Science & Technology*, 76, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.03.022>
- Matheson, N. K. (1996). The chemical structure of amylose and amylopectin fractions of starch from tobacco leaves during development and diurnally-nocturnally. *Carbohydrate Research*, 282(2), 247-62. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(95\)00381-9](https://doi.org/10.1016/0008-6215(95)00381-9)
- Morales-Trejo, F., Trujillo-Ramírez, D., Aguirre-Mandujano, E., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E. J. y Alvarez-Ramirez, J. (2022). Ultrasound-assisted extraction of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) seed starch: Physicochemical and functional properties. *Starch-Stärke*, 74(1-2), 2100092. <https://doi.org/10.1002/star.202100092>
- Mwaurah, P. W., Kumar, S., Kumar, N., Panghal, A., Attkan, A. K., ... y Garg, M. K. (2020). Physicochemical characteristics, bioactive compounds and industrial applications of mango kernel and its products: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(5), 2421-2446. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12598>
- Nakthong, N., Wongsagonsup, R. y Amornsakchai, T. (2017). Characteristics and potential utilizations of starch from pineapple stem waste. *Industrial Crops and Products*, 105, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.048>
- Nicolás-García, M., Borrás-Enríquez, A. J., González-Escobar, J. L., Calva-Cruz, O. J., Pérez-Pérez, V. y Sánchez-Becerril, M. (2023). Phenolic Compounds in Agro-Industrial Waste of Mango Fruit: Impact on Health and Its Prebiotic Effect - a Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(1), 5-23. <https://doi.org/10.31883/pjfn/159361>
- Patiño-Rodríguez, O., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E. y Pacheco-Vargas, G. (2020). Pulp and peel of unripe stenospermocarpic mango (*Mangifera indica* L. cv Ataulfo)

- as an alternative source of starch, polyphenols and dietary fibre. *Food Research International*, 138, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109719>
- Pfister, B., Zeeman, S. C., Rugen, M. D., Field, R. A., Ebenhöf, O. y Raguin, A. (2020). Theoretical and experimental approaches to understand the biosynthesis of starch granules in a physiological context. *Photosynthesis Research*, 145, 55-70. <https://doi.org/10.1007/s11120-019-00704-y>
- Rahman, S. M. M. y Rakshit, S. K. (2004). Effect of endogenous and commercial enzyme on improving extraction of sweet potato starch. *ASAE Annual Meeting*. DOI:10.13031/2013.17034
- Salgado-Ordosgoitia, R. D., Rodriguez-Manrique, J. A., Cohen-Manrique, C. S., Mendoza-Ortega, G. P. (2018). Characterization of the techno-functional properties of starch from purple yam (*Dioscorea alata*), hawthorn yam (*Dioscorea rotundata*) and Diamante-22 type yam. *Dyna*, 85(207), 143-152. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72869>
- Sánchez-Camargo, A. P., Gutiérrez, L. F., Vargas, S. M., Martínez-Correa, H. A., Parada-Alfonso, F. y Narváez-Cuenca, C. E. (2019). Valorisation of mango peel: Proximate composition, supercritical fluid extraction of carotenoids, and application as an antioxidant additive for an edible oil. *The Journal of Supercritical Fluids*, 152, 104574. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.104574>
- Sandhu, K. S. y Lim, S. T. (2008). Structural characteristics and *in vitro* digestibility of Mango kernel starches (*Mangifera indica* L.). *Food Chemistry*, 107(1), 92-97. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.046>
- Seung, D. y Smith, A. (2019). Starch granule initiation and morphogenesis - progress in Arabidopsis and cereals. *Journal of Experimental Botany*, 70(3) 771-784. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery412>
- Seung, D. (2020). Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function. *New Phytologist*, 228(5), 1490-1504. <https://doi.org/10.1111/nph.16858>
- Seung, D., Soyk, S., Coiro, M., Maier, B.A., Eicke, S. y Zeeman, S. C. (2015). Protein targeting to starch is required for localising granule-bound starch synthase to Starch Granules and for Normal Amylose Synthesis in Arabidopsis. *PLoS Biology*, 13: e1002080. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002080>
- Silva, A. P. M., Oliveira, A. V., Pontes, S. M., Pereira, A. L., Rosa, M. F. y Azeredo, H. M. (2019). Mango kernel starch films as affected by starch nanocrystals and cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 211, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.013>
- Sit, N., Deka, S. C. y Misra, S. (2015). Optimization of starch isolation from taro using combination of enzymes and comparison of properties of starches isolated by enzymatic and conventional methods. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 4324-4332. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1462-z>

- Statista. (2018). *Mexico: food waste volume 2017, by product*. <https://www.statista.com/statistics/864035/volume-wasted-food-product-mexico/>
- Takeda, Y., Hizukuri, S., Takeda, C. y Suzuki, A. (1987). Structures of branched molecules of amyloses of various origins, and molecular fractions of branched and unbranched molecules. *Carbohydrate Research*, 165(1), 139-145. [https://doi.org/10.1016/0008-6215\(87\)80089-7](https://doi.org/10.1016/0008-6215(87)80089-7)
- Tester, R. F., Yousuf, R., Karkalas, J., Kettlitz, B. y Röper, H. (2008). Properties of protease-treated maize starches. *Food Chemistry*, 109(2), 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.043>
- Thory, R. y Sandhu, K. S. (2017). A Comparison of mango kernel starch with a novel starch from litchi (*Litchi chinensis*) kernel: Physicochemical, morphological, pasting, and rheological properties. *International Journal of Food Properties*, 20(4), 911-921. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1188403>
- Torres, P., Rodriguez, J. A. y Uribe, I. E. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: Influencia del medio de soporte. *Scientia et Technica*, 23, 75-80.
- Torres-León, C., Rojas, R., Contreras-Esquivel, J. C., Serna-Cock, L., Belmares-Cerda, R.E. y Aguilar, C. N. (2016). Mango seed: Functional and nutritional properties. *Trends in Food Science and Technology*, 55, 109-117. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.06.009>
- Villarreal, M. E., Ribotta, P. D. y Iturriaga, L. B. (2013). Comparing methods for extracting amaranthus starch and the properties of the isolated starches. *LWT- Food Science and Technology*, 51(2), 441-447. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.009>
- Wang, N., Shi, N., Fei, H., Liu Y., Zhang, Y., ... y Zhang D. (2022). Physicochemical, structural, and digestive properties of pea starch obtained via ultrasonic-assisted alkali extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 89, 106136. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106136>
- Wang, W., Wei, X., Jiao, G., Chen, W., Wu Y., ... y Tang, S. (2019). GBSS-BINDING PROTEIN, encoding a CBM48 domaincontaining protein, affects rice quality and yield. *Journal of Integrative Plant Biology*, 62: 948-966.
- Willfahrt, A., Steiner, E., Hötzel, J. y Crispin, X. (2019). Printable acid-modified corn starch as non-toxic, disposable hydrogel-polymer electrolyte in supercapacitors. *Applied Physics A* 125, 474. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2767-6>
- Zeeman, S. C., Tiessen, A., Pilling, E., Kato, K. L., Donald, A. M. y Smith, A. M. (2002). Starch synthesis in Arabidopsis. Granule synthesis, composition, and structure. *Plant Physiology*, 129, 516-529. <https://doi.org/10.1104/pp.003756>
- Zhang, C., Zhu, J., Chen, S., Fan, X., Li, Q., ... y Tang S. (2019b). Wx^b , the Ancestral Allele of Rice *Waxy* Gene. *Molecular Plant*, 12(8), 1157-1166. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2019.05.011>

- Zhang, L., Mei, J.-Y., Ren, M.-H. y Fu, Z. (2020). Optimization of enzyme-assisted preparation and characterization of *Arenga pinnata* resistant starch. *Food Structure*, 25, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100149>
- Zhang, X., Zhao, L., Zhou, W., Liu, X., Hu, Z. y Wang, K. (2022). Variations in the Multilevel Structure, Gelatinization and Digestibility of Litchi Seed Starches from Different Varieties. *Foods*, 11(18), 2821. <https://doi.org/10.3390/foods11182821>
- Zhang, Y., Li, B., Zhang, Y., Xu, F., Zhu, K., ... y Dong, W. (2019a). Effect of degree of polymerization of amylopectin on the gelatinization properties of jackfruit seed starch. *Food Chemistry*, 289, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.033>

Capítulo 5

Quitina y quitosano obtenidos de subproductos agroindustriales: características, aplicaciones y tendencias *Chitin and chitosan obtained from agro-industrial by-products: characteristics, applications and trends*

Neith Pacheco¹

Teresa Ayora Talavera¹

Juan Carlos Cuevas Bernardino^{2}*

Resumen

El presente capítulo analiza los avances recientes en las principales fuentes convencionales de quitina y quitosano aislados de subproductos agroindustriales; así como también, las fuentes alternativas o no convencionales de algunos otros subproductos que pueden ser utilizados como nuevas materias primas para la extracción de estos biopolímeros. Además, el documento se enfoca en comparar los métodos convencionales (químicos) y los amigables con el medio ambiente (verdes), utilizados solos o combinados durante el proceso de obtención, aislamiento y purificación tanto de quitina como de quitosano. Por otro lado, las características intrínsecas globales de la quitina y el quitosano se analizarán con técnicas instrumentales convencionales y emergentes, esto con el fin de poder comparar las diversas propiedades fisicoquímicas, estructurales, morfológicas y funcionales que pudieran conferir los distintos parámetros empleados en los diferentes métodos de extracción y en las distintas fuentes de materias primas utilizadas. Finalmente, el documento analiza las futuras aplicaciones y tendencias de estos polisacáridos, con la finalidad de redireccionar las investigaciones hacia el aprovechamiento

¹ Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Subsede Sureste, Parque Científico Tecnológico de Yucatán, km 5.5 carretera Sierra Papacal - Chuburná Puerto, Mérida, Yucatán, 97302, México.

² CONACYT-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Subsede Sureste, Parque Científico Tecnológico de Yucatán, km 5.5 carretera Sierra Papacal - Chuburná Puerto, Mérida, Yucatán, 97302, México.

*Autor de correspondencia: jcuevas@ciatej.mx

integral de los subproductos agroindustriales ricos en quitina y quitosano; y así poder generar nuevos desarrollos tecnológicos en áreas emergentes de la industria alimenticia, farmacéutica y cosmeceútica.

Palabras clave: Exoesqueletos, biopolímeros, residuos agroindustriales, tendencias futuras.

Summary

This chapter analyzes the recent advances in the main conventional sources of chitin and chitosan isolated from agro-industrial by-products; as well as alternative or unconventional sources of some other by-products that can be used as new raw materials for the extraction of these biopolymers. In addition, the document focuses on comparing conventional (chemical) and environmentally friendly (green) methods, both used alone or in combination during the process of obtaining, isolating, and purifying both chitin and chitosan. On the other hand, the global intrinsic characteristics of chitin and chitosan will be analyzed with conventional and emerging instrumental techniques, to be able to compare the different physicochemical, structural, morphological, and functional properties that could be conferred by the different parameters used both in the different extraction methods as well as the different sources of raw materials used. Finally, the document analyzes the future applications and trends of these polysaccharides, this with the purpose of redirecting research towards the comprehensive use of agro-industrial by-products rich in chitin and chitosan; and thus, be able to generate new technological developments with innovative applications in emerging areas of various industries such as food, pharmaceutical and cosmeceutical.

Keywords: Exoskeletons, biopolymers, agro-industrial by-products, future trends.

Introducción

La quitina es el aminopolisacárido más abundante presente en la naturaleza en los diferentes exoesqueletos de crustáceos, insectos y/o paredes celulares de hongos; este biopolímero puede ser convertido a quitosano mediante métodos de desacetilación enzimática o química. El quitosano es un biopolímero lineal compuesto de unidades de N-acetil-D-glucosamina ligadas por enlaces β (1-4)-glucosídicos, este biomaterial es generalmente obtenido de fuentes naturales accesibles de bajo costo tales como los subproductos agroindustriales de la pesca, además, por su origen natural, este polisacárido presenta interesantes propiedades de biodegradabilidad, biocompatibilidad y baja toxicidad, y por ello ha ido ganando mayor atención en numerosos sectores de la industria agrícola, alimentaria, médica y farmacéutica (Lárez Velásquez, 2023). Además, por ser el único polisacárido catiónico (carga

neta positiva) encontrado hasta ahora en la naturaleza, se convierte en un agente para estudios y aplicaciones enfocadas en el desarrollo de estructuras nano-antibacterianas, esto debido al mecanismo de atracción electrostática entre la carga positiva de los grupos funcionales del quitosano y la carga negativa de la membrana celular microbiana, lo cual afecta la permeabilidad de la célula y genera el efecto antibacteriano (Zhuoran et al., 2023). Otros factores que están involucrados de forma directa con la actividad antibacteriana del quitosano son: origen microbiano, factores intrínsecos (incluyendo: desacetilación y concentración, peso molecular y grado de polimerización), agentes ambientales específicos irregulares (como la temperatura y el valor de pH) (Zhuoran et al., 2023). Otra importante característica que diferencia al quitosano de la quitina nativa es con respecto a sus propiedades tecnofuncionales; los grupos amino de los residuos de D-glucosamina confieren solubilidad al quitosano en soluciones acuosas ácidas diluidas (pH entre 2 y 6), además, cuando los grupos funcionales del quitosano se protonan, este se convierte en un polication que puede formar complejos con la gran mayoría biomoléculas aniónicas, lo cual amplía su funcionalidad y aplicabilidad (Junceda-Mena et al., 2023).

Las propiedades tecnofuncionales están altamente correlacionadas con la fuente o materia prima, el grado de desacetilación, concentración de proteína y los métodos de extracción (químicos, biológicos, convencionales y alternativos) (Tarique et al., 2023). Por lo tanto, el objetivo del presente capítulo es proporcionar un panorama general de las principales fuentes agroindustriales y métodos de extracción, caracterización estructural y tendencias futuras de aplicación tanto de la quitina como el quitosano.

Fuentes y métodos de obtención de quitina y quitosano

Dentro de la rama de los biopolímeros, la quitina es el segundo polímero natural más abundante que existe, solo se encuentra abajo de la celulosa. Dicho polímero es ampliamente distribuido en los exoesqueletos de artrópodos invertebrados, tales como crustáceos e insectos; también se encuentra en la pared celular de hongos y algunas algas (Junceda-Mena et al., 2023). Debido a que el quitosano es obtenido a partir de métodos específicos de la quitina, se buscan fuentes alternativas de subproductos agroindustriales y métodos más eco-amigables. En la Tabla 1 se presentan las principales fuentes naturales y métodos de extracción tanto de quitina como de quitosano.

Tabla 1*Principales fuentes naturales de quitina y quitosano en la naturaleza*

Fuentes de quitina y quitosano	Tipo de quitina (QT) o quitosano (QS) y %	Métodos de extracción	Propiedades	Aplicaciones	Referencia
Crustáceos					
Cangrejo	QT 13 - 31 %	Método químico y biológico	Alta reactividad, presencia de grupos funcionales	Agricultura, industria cosmética y alimentaria	Joseph et al. (2021)
Camarón	QT 30 - 47 %	Método químico biológico	Alta capacidad quelante	Industria química y farmacéutica	Joseph et al. (2021)
Langosta	QT 30 %	Método químico biológico	Capacidad quelante	Industria farmacéutica y ambiental	Xu et al. (2020)
Gamba	QT 61%	Método químico y biológico	Materiales de bajo peso molecular	Industria alimentaria, agricultura y de empaques	Mathew et al. (2021)
Cefalópodos					
Pluma de calamar	QT	Método químico	Estabilidad mecánica, química y térmica,	Industria alimentaria, ingeniería de tejidos, industria farmacéutica	Joseph et al. (2021)
Insectos					
Larvas de escarabajos, moscas	QT 27-35 %	Método químico y biológico	Materiales de bajo peso molecular	Industria farmacéutica y ambiental	Psarianos et al. (2022).
grillos	QT2 - 5-7 %	Método químico y físico	Características nutrimentales	Industria alimenticia	Psarianos et al. (2022).
Cucaracha	QT 3 %	Métodos químicos	Capacidad de formación de películas	Industria de empaques	Chen et al. (2022)
Hongos y levaduras					
Absidia sp.	QS	Métodos físicos y enzimáticos	Regeneración de fibroblastos	Industria biomédica	Joseph et al. (2021).
Trichoderma harzianum	QS	Métodos físicos y enzimáticos	Efecto antimicrobiano	Industria biomédica y alimentaria	Joseph et al. (2021).
Mucor Rouxii	QS	Métodos físicos y enzimáticos	Efecto antibiótico	Industria farmacéutica	Joseph et al. (2021).

Fuentes de quitina y quitosano	Tipo de quitina (QT) o quitosano (QS) y %	Métodos de extracción	Propiedades	Aplicaciones	Referencia
A flavus	QS	Métodos físicos y enzimáticos	Capacidad quelante	Industria médica y alimenticia	Joseph et al. (2021).
Saccharomyces cerevisiae	QT	Métodos físicos y enzimáticos			Chakravarty y Edwards (2022)

Fuente: elaboración propia.

En general, la principal fuente de quitina/quitosano en la naturaleza son los crustáceos, dentro de los que destacan los cangrejos y camarones, ya que son especies que poseen exoesqueletos formados a partir de altas concentraciones de quitina, proteínas y minerales; además, los rendimientos de estos tipos de biopolímeros dependerán en gran medida de la forma en la que son producidos (capturados o cultivados en estanques), así como de la especie y hábitat. Por ejemplo, los exoesqueletos de camarón presentan un contenido de quitina de 30 a 47 %; mientras que los exoesqueletos del cangrejo poseen un contenido de quitina de alrededor del 13 al 31 %. En relación con otros crustáceos, los residuos de langosta (cabeza y gambas) también poseen un alto contenido de quitina; sin embargo, hay pocos estudios sobre el aprovechamiento de este tipo de subproductos para obtener quitosano. Además, los crustáceos son muy importantes en el sector acuícola y pesquero por su alta captura, cultivo y consumo, y generan altas cantidades de subproductos agroindustriales que pueden utilizarse a nivel industrial como fuentes de este tipo de biopolímeros. Tanto la quitina como el quitosano suelen presentar características fisicoquímicas y estructurales muy particulares (alta reactividad, capacidad quelante, estabilidad mecánica, química y térmica), lo que los hace biomateriales muy atractivos para distintas áreas de la industria; en la mayoría de los casos, las quitinas son obtenidas por métodos químicos, pero se han abordado diversos estudios sobre métodos biológicos tales como fermentaciones y procesos enzimáticos, esto con el fin de buscar alternativas de obtención más amigables con el medio ambiente (Joseph et al., 2021).

Otra fuente importante de quitina es la pluma de calamar, obtenida por método químico y utilizada en la industria farmacéutica, particularmente en la regeneración de tejidos, lo anterior por la alta solubilidad de este material una vez convertido a quitosano y su bajo peso molecular. Existen otras fuentes alternativas de quitina y quitosano que en recientes años han comenzado a ser estudiados con mayor detalle, entre ellos, los insectos, los cuales, al ser utilizados como una fuente de proteína para la industria alimentaria, generan grandes cantidades de residuos

ricos en quitina; en algunos casos el porcentaje puede ser superior al 30 % y en otros el porcentaje no supera el 10 %; sin embargo, la cantidad de residuo que se genera en esta agroindustria puede ser aprovechada para generar otro producto de valor agregado. La quitina obtenida de estas fuentes no convencionales generalmente tiene bajo peso molecular y puede reaccionar fácilmente para ser convertido a quitosano, además de otras propiedades tecnofuncionales que la fuente no convencional le puede aportar, como por ejemplo, la presencia de complejos de biopolímero-melanina. Aunque no hay una destacada producción industrial de este tipo de quitina obtenida de fuentes no convencionales mediante los métodos más utilizados, hay evidencia de aplicaciones novedosas en diversas áreas dentro de las que destacan las ambientales (Psarianos et al., 2022). Adicionalmente, los hongos y las levaduras son otras fuentes directas de quitina y quitosano, ya que este tipo de biopolímeros forman parte de su estructura, y aunque el contenido de este polisacárido es muy variable, generalmente se obtiene mediante procesos biológicos, enzimáticos y físicos y la mayoría de las aplicaciones se han enfocado en el área biomédica por el efecto antimicrobiano y de regeneración de tejidos que han demostrado (Joseph et al., 2021).

En general, el proceso químico convencional para la extracción de quitina y la obtención de quitosano, tras la desacetilación de quitina en medio alcalino, es ampliamente utilizado para la producción a gran escala de este tipo de biopolímeros debido a su bajo costo y corto tiempo de procesamiento, sin embargo, también, se están estudiando métodos biológicos como alternativas más amigables con el medio ambiente utilizando microorganismos o enzimas para el paso de desmineralización o desproteínización, respectivamente (Junceda-Mena et al., 2023). En general, este tipo de biopolímeros se extrae en forma muy similar en todos los casos; durante el proceso de desmineralización se elimina el calcio de las materias primas, en el paso de la desproteínización se descarta la proteína, en el paso de desacetilación se remueven los grupos acetil de la quitina para obtener quitosano y en la despigmentación se eliminan astaxantinas o carotenoides (Sixto-Berrocal et al., 2023). Otras investigaciones actualmente se están redireccionando en la extracción de la quitina y el quitosano mediante modificaciones químicas (acetilación, cuaternización, oxidativa) para mejorar sus propiedades físicas y estructurales (Tarique et al., 2023).

Caracterización estructural de la quitina y el quitosano

En la mayoría de los casos que se extraen y aíslan macromoléculas de nuevas fuentes no convencionales, se deben emplear técnicas analíticas que permitan caracterizar y garantizar la estructura fisicoquímica, estructural y morfológica. El quitosano,

por ejemplo, debe prestar un grado de desacetilación, en orden de ser considerado quitosano, este grado debe tener al menos 50 % de desacetilación (Junceda-Mena et al., 2023). A continuación, se presentan las principales técnicas analíticas empleadas para la caracterización de la quitina y el quitosano (Tabla 2).

Tabla 2

Principales técnicas analíticas empleadas en la caracterización de quitina y quitosano

Fuente de quitina y quitosano	Técnicas analíticas	Principales hallazgos	Referencias
Quitina y quitosano de cabezas de <i>Penaeus monodon</i> .	Espectroscopía FTIR, difracción de rayos X, análisis termogravimétricos (TGA, por siglas en inglés) y microscopía electrónica de barrido (SEM, por siglas en inglés).	Identificación de las amidas 1 y 2 por FTIR en quitina. La N-deacetilación de quitosano y grado de desacetilación (80 %) en quitosano por FTIR. La degradación térmica a los 260 °C. La morfología superficial por SEM fue estructura densa y compacta.	(Islam et al., 2023).
Quitina de cangrejo rey (<i>Paralithodes camtschaticus</i>).	Espectroscopía FTIR, difracción de rayos X, y peso molecular por viscosimetría.	Forma cristalina de α -quitina por FTIR y difracción de rayos X.	(Novikov et al., 2023).
Quitosano de escamas de pescado (<i>Labeo rohita</i>).	Calorimetría diferencial de barrido, FTIR, XRD y análisis termo gravimétrico (TGA).	13 picos característicos de quitosano del espectro FTIR, temperatura de fusión 81.9 °C y dos picos cristalinos a 8.82 y 20.4 ° (grado de cristalinidad de 72.6 %).	(Suresh et al., 2023).
Quitosano de insecto (<i>Eupolyphaga sinensis</i>)	FTIR, resonancia magnética nuclear H^1 , difracción de rayos X y TGA.	6 picos característicos de quitosano a 3367, 1598, 1083, 1325, 2876 y 1655 cm^{-1} de FTIR, 4 picos característicos de resonancia magnética nuclear H^1 a 1.93, 3.07, 3.62, 3.79 ppm, peso molecular de 127.79 kDa, dos picos de difracción de rayos X a 10.38 y 19.91° (grado de cristalinidad de 42.68 %).	(Jiang et al., 2023).
46 muestras de quitosano comercial.	Peso molecular por cromatografía de alta resolución de exclusión de tamaño, resonancia magnética nuclear H^1 , cromatografía de líquidos acoplada a espectrometría de masas, FTIR y FT-Raman.	FTIR y FT-Raman fueron métodos rápidos y económicos para determinar el grado de acetilación.	(Rehman et al., 2023).

Fuente de quitina y quitosano	Técnicas analíticas	Principales hallazgos	Referencias
Quitina y quitosano de langostino gigante de agua dulce (<i>Macrobrachium rosenbergii</i>).	Análisis de FTIR, XRD y SEM.	Identificación de 8 grupos funcionales (amida I característica de quitosano en la banda 1654 cm^{-1}) por FTIR, índices de cristalinidad de 83.43 a 91.28 % por XRD, estructura porosa y fibrilar por SEM.	(Terkula Iber et al., 2023).
Quitina y quitosano de camarón blanco (<i>Penaeus vannamei</i>).	Peso molecular por viscosidad intrínseca, espectroscopía FTIR y morfología por SEM.	Pesos moleculares de entre 138.56 - 115.03 kDa, viscosidad de entre 0.15 - 0.22 Pa s, grados de desacetilación de entre 90.75 a 87.13 % por FTIR y la morfología fue estructura microfibrilar y porosa.	(Dong et al., 2023).
Quitosano de quitina obtenida biológicamente.	Espectroscopía FTIR.	Grado de desacetilación de 79 %.	(Martín-López et al., 2021).
Quitosano de exoesqueletos de camarón blanco (<i>Litopenaeus vannamei</i>).	Resonancia magnética nuclear, espectroscopía FTIR, cromatografía de exclusión de tamaño, difracción de rayos X.	Grado de acetilación 78 %, peso molecular $3.928 \times 10^5\text{ g mol}^{-1}$, índice de cristalinidad de 87 %.	(Martín-López et al., 2020).

Fuente: elaboración propia con información de los autores citados.

En la mayoría de los casos se presentan las principales características estructurales de la quitina y el quitosano, que incluyen el peso molecular, el grado de acetilación y los grupos funcionales. Existen numerosas técnicas analíticas empleadas, tales como cromatografía de extrusión de tamaño, cromatografía de permeación en gel equipadas con un detector de índice refractivo para medir peso molecular. El grado de acetilación y los grupos funcionales por lo general se determinan a través de técnicas de espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés) y resonancia magnética nuclear C^{13} , el índice de cristalinidad de la estructura es comúnmente determinado por medio de difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) y el grado de polimerización por lo general es estimado mediante resonancia magnética nuclear H^1 , espectrometría de masas y cromatografía líquida de alta resolución (Hou et al., 2023).

Aplicaciones y tendencias futuras sobre la quitina y el quitosano

La quitina tiene pocas aplicaciones industriales debido a su insolubilidad en solventes comunes, mientras que el quitosano es soluble y tiene mayor variedad de usos debido a su biocompatibilidad y no toxicidad (Junceda-Mena et al., 2023). Múltiples tecnologías emergentes se utilizan para modificar la estructura de la quitina

en aras de obtener excelentes propiedades funcionales y ampliar las aplicaciones en áreas como conservación de alimentos, absorción de contaminantes del agua, biomedicina y biomimética extrema (Hou et al., 2023; Tarique et al., 2023).

Las valiosísimas propiedades fisicoquímicas, combinadas con las múltiples actividades biológicas (analgésicas, antitumorales, antiinflamatorias, antimicrobianas, etcétera) del quitosano y sus derivados, así como otras funcionalidades (como su capacidad para formar materiales y su biodegradabilidad), han hecho de la quitina y el quitosano alternativas interesantes para los materiales poliméricos a base de petróleo en las últimas décadas, sin embargo, los métodos de extracción deberían ser estudiados a detalle (Junceda-Mena et al., 2023).

Entre las múltiples aplicaciones, el quitosano se puede utilizar en el área enológica para la clarificación de mostos; en la preparación de películas para la remoción de contaminantes, ya sean orgánicos como la ocratoxina A o inorgánicos como algunos iones metálicos y sus sales; el control de la turbidez provocada por la precipitación de proteínas; el encapsulado de levaduras de interés enológico y enzimas para el control de microorganismos adversos como *Brettanomyces*; la fabricación de sensores y nanosensores para la cuantificación de contaminantes, el control de calidad de materias primas y productos finales, la optimización de procesos de fermentación, el seguimiento de las condiciones de almacenamiento, etcétera (Lárez Velásquez, 2023).

El quitosano y sus derivados pueden ser utilizados en el campo de la actividad antibacterial oral como portadores de fármacos antibacterianos, por un lado, para promover la cicatrización de las úlceras bucales y por otro lado, en los andamios compuestos de polímeros para formar preparaciones antibacterianas orales más ecológicas, mejorando las propiedades antibacterianas de los materiales orales en forma de rellenos nanoantibacterianos, además, también se puede utilizar como películas y recubrimientos de nanocompuestos para inhibir la producción de biopelículas de cepas orales comunes (Zhuoran et al., 2023).

Con respecto a la ingeniería biomédica, tanto la quitina como el quitosano son interesantes candidatos para desarrollar hidrogeles a base de polímeros naturales como agentes cicatrizantes de heridas, debido a la actividades antibacteriales, antioxidantes, hemostáticas y biocompatibles, lo cual se ve reflejado a través de la regulación de respuestas inflamatorias y promoviendo la deposición de colágeno y la formación de vasos sanguíneos en modelos murinos donde se han evaluado (Cao et al., 2023).

Otro campo de aplicación en el cual la quitina y el quitosano ha tenido un gran auge es en el desarrollo de empaques activos/inteligentes a base de compuestos bioactivos para indicar la frescura de carne de cerdo durante su periodo

de almacenamiento y este tipo de materiales de empaque deberían ser estudiados a profundidad para extender la aplicación práctica en el futuro (Wang et al., 2023). Recientemente, se ha incrementado el estudio y desarrollo de materiales basados en polímeros naturales, para determinar la idoneidad de los materiales de quitosano como envasado de alimentos, y se han identificado sus ventajas y limitaciones, de hecho, gracias a la posibilidad de modificar la matriz de quitosano mediante el uso de aditivos naturales, es posible fortalecer la actividad antioxidante y antimicrobiana de las películas de quitosano, lo que significa que, en el futuro cercano, los materiales basados en quitosano serán una alternativa más amigable para el medio ambiente, sin embargo, aún se necesita más investigación sobre quitosano y sus combinaciones con varios materiales para la aplicación de este biopolímero en el envasado de alimentos y llevar su aplicación a los niveles industriales (Carvalho et al., 2023).

Algunas perspectivas futuras sobre este tipo de biopolímeros se incluyen a continuación: (a) explorar nuevos métodos de modificación ambientales y eficientes, no solo en términos del rendimiento de los productos modificados, sino también con respecto a la relación entre las condiciones de tratamiento y los posibles cambios estructurales; (b) desarrollar las últimas técnicas para detectar y evaluar con precisión la estructura y las propiedades funcionales de la quitina y el quitosano y sus productos modificados, a fin de cumplir con los requisitos de producción y aplicación a gran escala; (c) comprender de manera precisa y completa las relaciones entre los métodos de modificación, las características estructurales y las propiedades funcionales, esto para recopilar y organizar más información y datos para formar una red en el tema para cumplir con las aplicaciones específicas y precisas (Hou et al., 2023). Además, como nueva perspectiva de investigación, se aconseja cambiar los pasos del proceso de extracción de quitina y quitosano, por ejemplo, incursionar en proceso inverso (primero desproteinización y segundo desmineralización) para observar si mejora el rendimiento y la calidad final del producto (Sixto-Berrocal et al., 2023).

En el campo de la investigación de estos biopolímeros obtenidos de subproductos agroindustriales, debe haber un consenso claro sobre las dos primeras etapas en el proceso de producción. A pesar de que la literatura actual sobre la producción de quitina y quitosano ha utilizado la desmineralización seguida de la etapa de desproteinización, se necesitan más estudios comparativos para la armonización futura del orden de las etapas de producción en vías de las mejores prácticas y la mejora de los protocolos de producción de quitina y quitosano. Además, se requiere la profunda caracterización molecular de los precursores para determinar si los procesos de las dos etapas tienen alguna influencia en sus genomas, esto dentro de los contextos de economía circular y economía verde (Issahaku et al., 2023).

Conclusiones

La quitina y el quitosano son biopolímeros muy interesantes debido a sus características intrínsecas que pueden ser potencializadas al ser modificadas sus estructuras químicas o al interactuar con otras biomoléculas de carga opuesta. Aunque la cantidad de investigaciones sobre extracción y asilamiento de quitina y quitosano de fuentes convencionales y no convencionales se han incrementado en las bases de datos científicas en los últimos años, la mayoría de estas tecnologías se centra en los mismos métodos de extracción y las técnicas de caracterización, por lo que las nuevas tendencias o perspectivas sobre el aprovechamiento de subproductos agroindustriales se vuelven muy interesantes para obtener quitina y quitosano a través de nuevos métodos verdes y amigables con el medio ambiente y sobre todo escalar la producción.

Referencias

- Cao, H., Xiang, D., Zhou, X., Yue, P., Zou, Y., Zhong, Z., Ma, Y., Wang, L., Wu, S., y Ye, Q. (2023). High-strength, antibacterial, antioxidant, hemostatic, and biocompatible chitin/PEGDE-tannic acid hydrogels for wound healing. *Carbohydrate Polymers*, 120609. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.120609>
- Carvalho, F., Stefanowska, K., Woźniak, M. W., Dobrucka, R., y Ratajczak, I. (2023). Chitosan with Natural Additives as a Potential Food Packaging. *Materials* 2023, 16(4), 1579. <https://doi.org/10.3390/MA16041579>
- Chen, S., Zhang, Z., Wei, X., Sui, Z., Geng, J., Xiao, J., y Huang, D. (2022). Antibacterial and antioxidant water-degradable food packaging chitosan film prepared from American cockroach. *Food Bioscience*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101893>
- Dong, Q., Qiu, W., Feng, Y., Jin, Y., Deng, S., Tao, N., y Jin, Y. (2023). Proteases and microwave treatment on the quality of chitin and chitosan produced from white shrimp (*Penaeus vannamei*). *EFood*, 4(2), e73. <https://doi.org/10.1002/EFD2.73>
- Hou, F., Gong, Z., Jia, F., Cui, W., Song, S., Zhang, J., Wang, Y., y Wang, W. (2023). Insights into the relationships of modifying methods, structure, functional properties, and applications of chitin: A review. *Food Chemistry*, 409. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.135336>
- Islam, M. M., Islam, R., Mahmudul Hassan, S. M., Karim, M. R., Rahman, M. M., Rahman, S., Nur Hossain, M., Islam, D., Aftab Ali Shaikh, M., y Georghiou, P. E. (2023). Carboxymethyl chitin and chitosan derivatives: Synthesis, characterization, and antibacterial activity. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 5, 100283. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2023.100283>
- Issahaku, I., Tetteh, I. K., y Tetteh, A. Y. (2023). Chitosan and chitosan derivatives: Recent advancements in production and applications in environmental

- remediation. *Environmental Advances*, 11, 100351. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2023.100351>
- Jiang, F., Li, X., Duan, Y., Li, Q., Qu, Y., Zhong, G., Qiu, M., Zhang, J., Zhang, C., y Pan, X. (2023). Extraction and characterization of chitosan from *Eupolyphaga sinensis* Walker and its application in the preparation of electrospinning nanofiber membranes. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 222, 113030. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFB.2022.113030>
- Joseph, S. M., Krishnamoorthy, S., Paranthaman, R., Moses, J. A., y Anandharamakrishnan, C. (2021). A review on source-specific chemistry, functionality, and applications of chitin and chitosan. In *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* (Vol. 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100036>
- Junceda-Mena, I., García-Junceda, E., y Revuelta, J. (2023). From the problem to the solution: Chitosan valorization cycle. *Carbohydrate Polymers*, 309(November 2022), 120674. <https://doi.org/10.1016/J.CARPOL.2023.120674>
- Láirez Velásquez, C. (2023). Chitosan and its applications in oenology. *OENO One*, 57(1), 121-132. <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2023.57.1.7262>
- Martín-López, H., Pech-Cohuo, S. C., Ayora-Talavera, T., Cuevas-Bernardino, J. C., Ramos-Díaz, A., Espinosa-Andrews, H., Shirai, K., y Pacheco, N. (2021). Deacetylation of chitin obtained by biological method and its application in melipona honey-incorporated antimicrobial biofilms. *MRS Advances*, 6(38), 885-892. <https://doi.org/10.1557/S43580-021-00168-0>
- Martín-lópez, H., Pech-cohuo, S. C., Herrera-pool, E., Medina-torres, N., Cuevas-bernardino, J. C., Ayora-talavera, T., Espinosa-andrews, H., Ramos-díaz, A., Trombotto, S., y Pacheco, N. (2020). Structural and physicochemical characterization of chitosan obtained by uae and its effect on the growth inhibition of *pythium ultimum*. *Agriculture (Switzerland)*, 10(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE10100464>
- Mathew, G. M., Puthiyamadham, A., Sasikumar, K., Ashoor, S., y Sukumaran, R. K. (2021). Biological treatment of prawn shell wastes for valorization and waste management. *Bioresource Technology Reports*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100788>
- Novikov, V. Yu., Rysakova, K. S., Shumskaya, N. V., Mukhortova, A. M., y Kesarev, K. A. (2023). King crab gills as a new source of chitin/chitosan and protein hydrolysates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 232, 123346. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123346>
- Psarianos, M., Dimopoulos, G., Ojha, S., Cavini, A. C. M., Bußler, S., Taoukis, P., y Schlüter, O. K. (2022). Effect of pulsed electric fields on cricket (*Acheta domesticus*) flour: Extraction yield (protein, fat, and chitin) and techno-functional properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102908>

- Rehman, H. U., Cord-Landwehr, S., Shapaval, V., Dzurendova, S., Kohler, A., Moerschbacher, B. M., y Zimmermann, B. (2023). High-throughput vibrational spectroscopy methods for determination of degree of acetylation for chitin and chitosan. *Carbohydrate Polymers*, 302, 120428. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120428>
- Sixto-Berrocal, A. M., Vázquez-Aldana, M., Miranda-Castro, S. P., Martínez-Trujillo, M. A., y Cruz-Díaz, M. R. (2023). Chitin/chitosan extraction from shrimp shell waste by a completely biotechnological process. *International Journal of Biological Macromolecules*, 230, 123204. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123204>
- Suresh, S., Umesh, M., y Santosh, A. S. (2023). Biological extraction of chitin from fish scale waste using proteolytic bacteria *Stenotrophomonas koreensis* and its possible application as an active packaging material. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1007/S13399-023-03865-Y/FIGURES/9>
- Tarique, J., Sapuan, S. M., Aqil, N. F., Farhan, A., Faiz, J. I., y Shahrizan, S. (2023). *A Comprehensive Review Based on Chitin and Chitosan Composites*. 15-66. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5327-9_1
- Terkula Iber, B., Torsabo, D., Engku Noramalina Che Engku Chik, C., Wahab, F., Rozaimah Sheikh Abdullah, S., Abu Hassan, H., y Azman Kasan, N. (2023). A study on the effects of interfering with the conventional sequential protocol for chemical isolation and characterization of chitosan from biowaste of giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Heliyon*, 9, e13970. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13970>
- Wang, F., Xie, C., Tang, H., Hao, W., Wu, J., Sun, Y., Sun, J., Liu, Y., y Jiang, L. (2023). Development, characterization, and application of intelligent/active packaging of chitosan/chitin nanofibers films containing eggplant anthocyanins. *Food Hydrocolloids*, 139. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2023.108496>
- Xu, W., Mohan, A., Pitts, N. L., Udenigwe, C., y Mason, B. (2020). Bile acid-binding capacity of lobster shell-derived chitin, chitosan and chitoooligosaccharides. *Food Bioscience*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100476>
- Zhuoran, L., Yumei, L., Junyan, L., Tong, Y., Ming, J., y Yourui, L. (2023). Role of chitosan and its derivatives in the field of oral antibacterial. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 27(21), 3361-3367. <https://doi.org/10.12307/2023.136>

Capítulo 6

Métodología para la identificación de biosurfactantes y gramicidina en corrientes residuales alimentarias *Methodology for the identification of biosurfactants and gramicidin in food waste streams*

Xanel Vecino Bello

**Ana Belén Moldes Mendiña*

José Manuel Cruz Freire¹

Resumen

Las corrientes residuales agroalimentarias son una fuente interesante como suplemento nutricional, de bajo coste, para la producción de compuestos bioactivos vía procesos fermentativos. Sin embargo, existen pocos estudios sobre la identificación y extracción directa de estos metabolitos secundarios de dichas corrientes alimentarias. Dado que, en las aguas residuales de la industria alimentaria, favorecidos por la alta concentración de nutrientes, crecen de forma espontánea gran variedad de microorganismos, estos podrían ser una fuente excelente para la obtención directa de metabolitos secundarios entre los que se encuentran agentes tensioactivos como los biosurfactantes y antibióticos como la Gramicidina. En este capítulo se incluyen estrategias para detectar, extraer y analizar este tipo de compuestos a partir de corrientes residuales de la industria alimentaria, que sirva como guía a alumnos de cursos avanzados interesados en el aprovechamiento de residuos industriales para la obtención de compuestos bioactivos con capacidad surfactante, así como antibióticos como la gramicidina, promocionando la economía circular y un desarrollo más sostenible en consonancia con los objetivos de la Agenda 2030.

Palabras clave: aguas residuales, industria alimentaria, metabolitos secundarios, separación, análisis, biodetergentes.

¹ Departamento de Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Industrial (EEI) - Centro de Investigación en Tecnologías, Energía y Procesos Industriales (CINTECX), Universidad de Vigo, Campus As Lagoas-Marcosende, 36310 Vigo, España.

*Autor de correspondencia: amoldes@uvigo.es

Summary

It is known that agri-food waste streams are an interesting source as a low-cost nutritional supplement to produce bioactive compounds through fermentative processes. However, there are few studies on the identification and direct extraction of secondary metabolites from food streams. Given that a great variety of microorganisms grow spontaneously in wastewater from the food industry, favored by the high concentration of nutrients, hence these could be an excellent source for the direct extraction of secondary metabolites, including surface active compounds such as biosurfactants and antibiotics such as Gramicidin. Therefore, in this chapter are included different strategies to detect, extract and analyze this type of compounds from residual streams of the food industry, which serves as a guide for students of advanced courses interested in the use of industrial waste to obtain bioactive compounds with surfactant capacity or antibiotics such as Gramicidin, promoting a circular economy and a sustainable development according with the goals of H2030 Agenda.

Keywords: wastewater, food industry, secondary metabolites, separation, analysis, biodegradants.

Biosurfactantes en aguas residuales alimentarias

Los biosurfactantes son metabolitos secundarios poliméricos producidos por hongos, bacterias y/o levaduras capaces de reducir la tensión superficial del agua en más de 8 unidades, aunque existen biosurfactantes que son capaces de reducir esta tensión en más de 20 unidades (Rodrigues et al., 2006). Entre las ventajas de los biosurfactantes, respecto a los surfactantes químicos, destacan su biocompatibilidad y biodegradabilidad, por lo que su uso supone un incentivo para la industria agroquímica, farmacéutica y alimentaria con el fin de obtener formulaciones más biocompatibles y con menos agentes químicos.

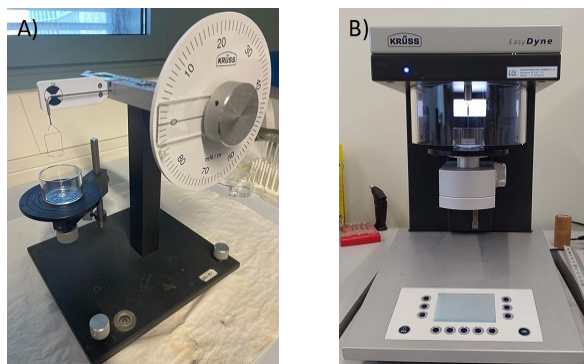
Existen distintos tipos de biosurfactantes producidos por microorganismos, entre los que se incluyen: glicolípidos -por *Candida* o *Pseudomonas*-, glicopéptidos -por *Lactobacillus*-, lipopéptidos -por *Bacillus*- esporulados entre los que se incluye *Bacillus subtilis* o glicolipopéptidos -por *Lactobacillus*- (Moldes et al., 2020). Además de su diversidad con base en la composición química, los biosurfactantes pueden estar unidos a la membrana celular de microorganismos, conocidos en este caso como biosurfactantes ligados a células o *cell-bound*, o excretados al medio de cultivo, llamados biosurfactantes extracelulares. Estas variaciones en los biosurfactantes implican métodos de análisis y procesos de extracción diferentes (Bustos et al., 2018; De Souza et al., 2018; Dardouri et al., 2021; Pal et al., 2022; Yu et al., 2023).

Detección de biosurfactantes

La forma más sencilla de detectar la presencia de biosurfactantes en una corriente residual es mediante la medición de su tensión superficial. Para ello es necesario eliminar los sólidos de estas corrientes mediante filtración y/o centrifugación, ya que estos pueden interferir en la medida de la tensión superficial. Una sustancia que presente una buena capacidad surfactante será capaz de reducir la tensión superficial del medio fermentado en más de 20-30 unidades. La tensión superficial de una corriente residual fermentada procedente de la industria alimentaria se puede medir con un tensiómetro ya sea de placa o de anillo. Ambos tensiómetros basan su medida en la fuerza requerida para retirar un anillo Du Noüy o placa Wilhelmy de platino de la superficie del líquido. En la Figura 1 se muestra la imagen de los dos tipos de tensiómetros más utilizados en la medida de tensiones superficiales. En la Figura 1a, se muestra un tensiómetro manual con anillo Du Noüy de platino y en la Figura 1b, un tensiómetro automático con una placa Wilhelmy de platino. Los tensiómetros miden la fuerza que hay que ejercer para romper las fuerzas intermoleculares que unen a las moléculas de agua con la placa o anillo de platino, generalmente se mide en mN/m. Para analizar la tensión superficial, es necesario introducir la placa o anillo de platino en la disolución a la que se está midiendo la tensión superficial y posteriormente separar poco a poco la placa o anillo de la disolución, hasta que se rompa dicha unión. En presencia de un agente surfactante, la fuerza que hay que ejercer para romper dicha unión es menor.

Figura 1

A) Tensiómetro manual; b) Tensiómetro automático



Fuente: fotografías tomadas por el autor.

Por otra parte, un compuesto biosurfactante va a reducir la tensión superficial del medio en el que se encuentra hasta un límite a partir del cual un aumento de la concentración de biosurfactante no va a producir cambios en la tensión superficial de la fase en la que se encuentran dichos compuestos tensioactivos. Aquella concentración de biosurfactante que permite alcanzar la máxima reducción de la tensión superficial se denomina concentración micelar crítica (CMC) y esta se puede determinar haciendo disoluciones seriadas del extracto biosurfactante o del medio en el que este se encuentra con el fin de conocer si una corriente alimentaria está más o menos concentrada en biosurfactante. Por ejemplo, dos aguas residuales alimentarias (C1 y C2) contienen surfactina, uno de los biosurfactantes más estudiados en la bibliografía, consistente en un conjunto de lipopéptidos producidos por la cepa de *Bacillus* esporulado, *Bacillus subtilis*, los cuales tienen capacidad de rebajar la tensión superficial de un medio acuoso hasta 27 mN/m. Si tras medir la tensión superficial de C1 y C2 se tienen 27 mN, se puede sospechar de la presencia de lipopéptidos como la surfactina que tienen una CMC alrededor de $1,00 \times 10^{-5}$ y 8.13×10^{-6} mol/L (Zdziennicka et al., 2018). Por tanto, la concentración mínima que puede existir de surfactina tanto en C1 como en C2 está en torno a estos valores. Sin embargo, si se desea calcular la concentración exacta de surfactina que hay en la corriente residual es necesario realizar diluciones seriadas de esta agua hasta obtener valores de la tensión superficial por encima del valor mínimo y después calcular la concentración de biosurfactante multiplicando el valor de CMC por el factor de dilución a partir del cual empieza a subir la tensión superficial tanto de C1 como C2, siguiendo la ecuación 1.

$$BS_c = CMC \times FD$$

Ecuación 1

Siendo BS, la concentración de biosurfactante en mol/L; CMC, la concentración mínima de biosurfactante que produce la máxima reducción en la tensión superficial del agua a evaluar, también en mol/L y FD es el factor de dilución a partir del cual empiezan a subir los valores de la tensión superficial, siendo este adimensional. Si se desea, se puede convertir la concentración de equivalentes de surfactina en mol/L a g/L simplemente multiplicando por el peso molecular de la surfactina que se sitúa alrededor de 1036 g/mol. Aunque también pueden existir isoformas de mayor peso molecular en torno a 1435-1505 g/mol, en este caso la isoforma de la surfactina recibe el nombre de fengicina (de Sousa et al., 2018).

Otra estrategia para el cálculo de la concentración de biosurfactante en un agua residual consiste en elaborar una recta de calibrado con un surfactante comercial, del cual se sospecha su presencia, donde se obtengan valores de

tensión superficial para concentraciones inferiores a la CMC, ya que por debajo de la CMC existe una relación lineal entre la concentración de biosurfactante y la tensión superficial que este provoca en el medio en estudio. Así, Rodrigues et al. (2006) elaboraron una recta de calibrado con surfactina comercial para calcular los equivalentes producidos en surfactina por parte de diferentes bacterias lácticas en fermentaciones controladas. De esta recta de calibrado obtuvieron una ecuación (ecuación 2), con la que se puede calcular la concentración de biosurfactante obtenida, en equivalentes de surfactina, en varios medios y extractos fermentados por bacterias lácticas. Esta misma estrategia se puede aplicar en un agua residual siempre que se diluya esta agua hasta observar un incremento en su tensión superficial. Cuando, tras diluciones seriadas, se empiezan a notar cambios en el incremento de la tensión superficial de la corriente en evaluación, significa que se está en la zona de la recta de calibrado en la que la concentración de biosurfactante es directamente proporcional al valor de tensión superficial. En este caso la concentración de biosurfactante ($BS_{C_{eq}}$) se podría calcular aplicando la ecuación 2 propuesta por Rodrigues et al. (2006) y obtenida a partir de una recta de calibrado con surfactina comercial, siempre y cuando se sospeche de la presencia de un biosurfactante de naturaleza similar a la surfactina. En caso de sospechar de la presencia de otro tipo de biosurfactante, por ejemplo, ramnolípido, habría que elaborar una recta de calibrado con un ramnolípido comercial de forma similar a la surfactina.

$$BS_{C_{eq}} = (TS - 76.984) / -8.6465 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $BS_{C_{eq}}$ es la concentración de biosurfactante en el agua residual en equivalentes de surfactina calculada con base en valores de la tensión superficial (TS).

Algunos autores proponen medir la capacidad dispersante del medio de fermentación centrifugado, ya que la presencia de biosurfactantes provocará que el medio fermentativo disperse el aceite sobre el agua (Rodríguez-López et al., 2018). A mayor capacidad dispersante, mayor capacidad surfactante, y por tanto mayor concentración de biosurfactantes. Este experimento puede llevarse a cabo utilizando placas Petri donde se le añaden 20 mL de agua y encima una disolución de aceite, la cual ocupará toda la superficie del agua inhibiendo el paso de luz a través de esta. Esta placa se utilizará como control, en comparación con placas sometidas al mismo protocolo, con la adición de 80 μ L del medio fermentado que contiene biosurfactante, aunque esta cantidad puede aumentarse, con el fin de ver un resultado significativo, en caso de que se considere que la concentración de extracto biosurfactante en el medio de fermentación sea baja. De existir biosurfactante en

el medio de fermentación, se producirá una dispersión del aceite hacia los bordes de la placa, dejando en el medio un espacio libre de aceite, midiéndose el diámetro mayor y menor del espacio central libre de aceite.

Métodos de separación y extracción de biosurfactantes

Extracción de lipopéptidos

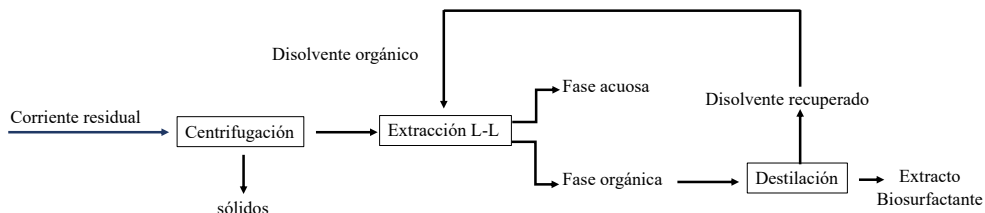
Los lipopéptidos generalmente se extraen de los medios fermentados, tras centrifugación, aplicando un proceso de precipitación ácida seguida de una extracción líquido-líquido con disolventes orgánicos entre los que se encuentran: metanol; etanol, cloroformo o acetato de etilo. Así, Yu et al. (2023) proponen la centrifugación del medio fermentado seguida de una precipitación ácida con 0.3 % - 0.8 % de ácido sulfúrico concentrado hasta alcanzar un pH de entre 2 y 3, seguida de la centrifugación de la mezcla. Tras la centrifugación, se obtiene un precipitado que es sometido a un proceso de extracción con disolventes orgánicos. Dentro de los disolventes orgánicos de elección se encuentran el diclorometano, cloroformo, metanol o etanol, de forma conjunta o separada. Estos autores también proponen el uso de NaOH 10 M para lavar el precipitado que contiene los lipopéptidos para eliminar los protones residuales que pudieran quedar de la etapa anterior de precipitación ácida.

Otros autores (Rodríguez-López et al., 2020) optan por la extracción directa con disolventes orgánicos, sin aplicar el proceso previo de precipitación. Además, existen procesos de extracción en los que se aplican membranas; así, Chen et al. (2007), propusieron una precipitación ácida con HCl seguida de una disolución del precipitado en NaOH hasta pH 11, y de una separación con membranas de tamaño de poro variable en función de si se quiere retener el biosurfactante en forma de micela (membrana de ultrafiltración) o en forma monomérica (membrana de nanofiltración). En caso de optar por la nanofiltración, estos autores proponen la adición etanol para destruir las micelas y obtener los biosurfactantes en forma monomérica mediante la aplicación de membranas de ultrafiltración como última etapa.

En la Figura 2 y Figura 3 se ilustran las dos alternativas más aplicadas en la literatura para la extracción de lipopéptidos a partir de medios fermentados, que implica la extracción con disolventes orgánicos como única etapa (Figura 2) o proceso secuencial en 2 etapas constituidas por precipitación ácida y extracción con disolventes orgánicos (Figura 3) (Ostendorf et al., 2018).

Figura 2

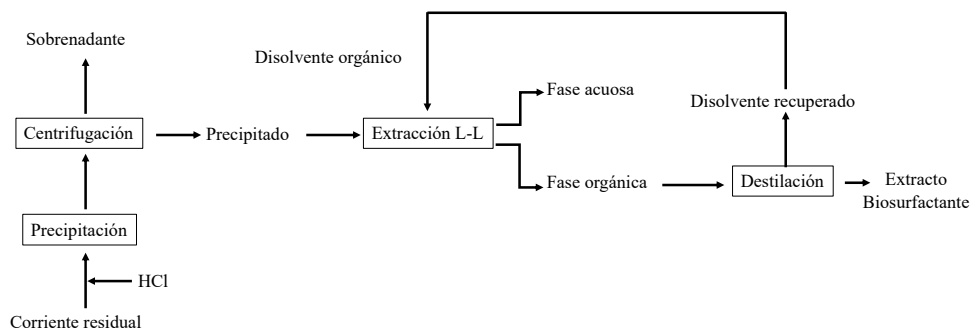
Proceso general para la extracción de biosurfactantes lipopéptidos a partir de corrientes residuales, mediante extracción líquido-líquido con recuperación del disolvente



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3

Proceso general para la extracción de biosurfactantes lipopéptidos a partir de corrientes residuales, mediante precipitación con HCl y posterior purificación con extracción líquido-líquido con recuperación del disolvente



Fuente: elaboración propia.

Extracción de glicolípidos

Los glicolípidos son un conjunto de moléculas formadas por azúcares y lípidos, siendo los más conocidos los ramnolípidos, producidos por bacterias del género *Pseudomonas*, principalmente, *P. aeruginosa* y los soforolípidos producidos generalmente por levaduras del género *Candida*, principalmente *C. bombicola* (Otoniel et al., 2015; Jadhav et al., 2018; Dardouri et al., 2021; Pal et al., 2022). Tanto soforolípidos como ramnolípidos son excretados al medio de fermentación. Entre los métodos propuestos en la bibliografía para su separación y purificación, se encuentran la extracción con disolventes orgánicos (Jadhav et al., 2018; Pal et al., 2022), seguida de un proceso de purificación utilizando extracción líquido-sólido y cromatografía de adsorción (Jadhav et al., 2018). Otros autores proponen la espectrometría de

masas (MS) en tándem con cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), utilizando una matriz sólida en fase reversa, para la purificación e identificación de soforolípidos y ramnolípidos (Dardouri et al., 2021). Con esta tecnología los autores identificaron entre 10 y 13 congéneres de soforolípidos y ramnolípidos, respectivamente.

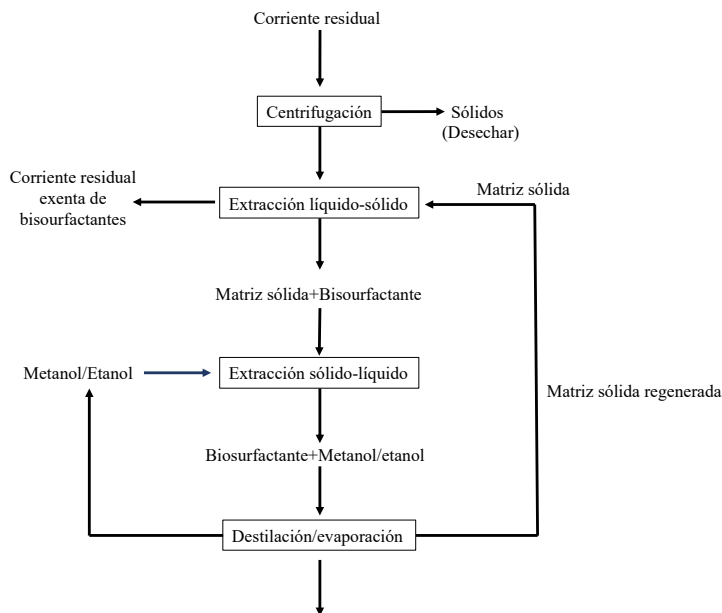
Siguiendo esta misma línea, Pratap et al. (2021) proponen la purificación de soforolípidos combinando extracción con disolventes orgánicos y cromatografía en columna, alcanzando una concentración máxima de 42.9 g/L de soforolípidos en las condiciones óptimas de fermentación. El soforolípido se identificó y purificó mediante cromatografía en columna de gel de sílice y se caracterizó mediante cromatografía en capa fina (TLC), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), HPLC y cromatografía líquida acoplada a espectroscopia de masas (LC-MS).

Tang et al. (2020) llevaron a cabo la extracción y purificación de soforolípidos mediante acidificación del medio y extracción bifásica, mientras que Otoniel et al. (2015) optaron como método para la extracción de ramnolípidos la adsorción con una matriz sólida (XAD2), seguida de un proceso de desorción con metanol, el cual puede ser recuperado mediante destilación o evaporación, obteniendo un extracto biosurfactante formado por ramnolípidos. Los ramnolípidos fueron producidos utilizando un medio fermentativo comercial, así como un consorcio de cepas de *Pseudomona* aisladas de distintos ambientes. Aunque los métodos cromatográficos son adecuados para la purificación e identificación de estos biosurfactantes, a la hora de obtener un producto comercial los disolventes orgánicos son más operativos, ya que implican menos costes de producción, sobre todo si el disolvente orgánico se puede recuperar, aunque el extracto tendrá más impurezas que si se aplican procesos de extracción líquido-sólido con adsorbentes específicos.

En la Figura 4 se recoge el protocolo de actuación para la extracción de glicolípidos con matrices sólidas. El uso de matrices sólidas presenta el inconveniente de que el trabajo es semicontinuo, ya que las matrices tienen una capacidad limitada y una vez saturadas hay que regenerarlas, separando los biosurfactantes de la misma mediante un agente desorbente, que suele ser etanol o metanol. Posteriormente, el metanol o etanol se recupera por destilación o evaporación obteniendo el extracto biosurfactante.

Figura 4

Proceso general para la extracción de biosurfactantes a partir de corrientes residuales, mediante extracción líquido-sólido con matrices sólidas



Fuente: elaboración propia.

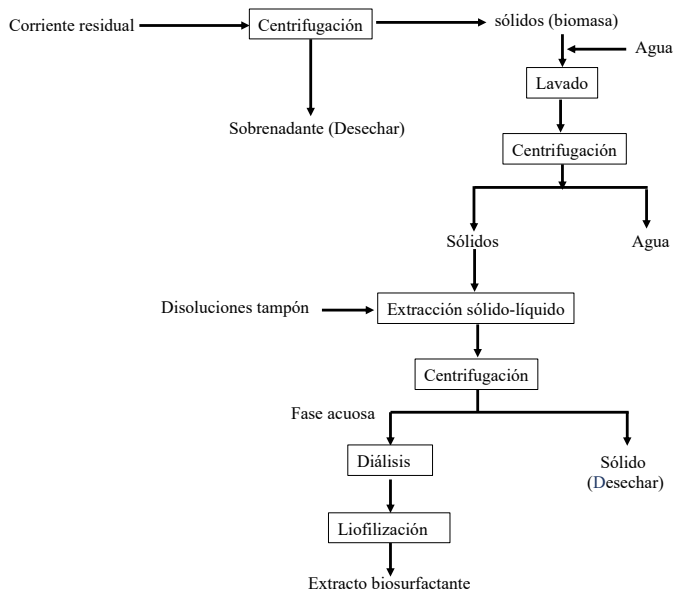
Extracción de glicopéptidos y glicolipopéptidos

Existe un grupo de biosurfactantes constituidos por péptidos y azúcares, principalmente, que suelen estar adheridos a la membrana plasmática de los microorganismos productores de los mismos. Estos biosurfactantes no son excretados al medio de fermentación, y, por tanto, su extracción es bastante diferente de los biosurfactantes convencionales producidos extracelularmente (Rodrigues et al., 2006; Bustos et al., 2018). En este caso, para la extracción de los biosurfactantes, se centrifuga el medio fermentado, desechando la fase líquida y reservando la fase sólida que contiene la biomasa con los biosurfactantes adheridos a la membrana plástica. A continuación, la biomasa se lava con agua desionizada y se somete, una vez centrifugada, de nuevo a un proceso de extracción sólido-líquido con tampón fosfato salino (PBS), de tal forma que se obtiene un extracto acuoso rico en biosurfactantes. Tras este paso, la biomasa exenta de biosurfactantes se desecha y la fase líquida se somete a un proceso de diálisis para eliminar las sales y a un proceso de filtración y liofilización para una conservación adecuada (Figura 5). El aspecto de este extracto biosurfactante es de polvo blanco-amarillo. Este protocolo

de extracción ha sido aplicado sobre todo a medios fermentados por bacterias lácticas (Vecino et al., 2015; Bustos et al., 2018), caracterizadas por la producción de biosurfactantes adheridos a su membrana plasmática.

Figura 5

Proceso general para la extracción de biosurfactantes no extracelulares a partir de corrientes residuales



Fuente: elaboración propia.

Producción y extracción de gramicidina

La gramicidina es un antibiótico producido por especies esporuladas del género *Bacillus*, entre los que se encuentran el *Bacillus Brevis* o también denominado *Anerurinibacillus aneuriniliticus*. Su estructura molecular está conformada por 15 aminoácidos que se disponen de forma lineal dando lugar a distintas isoformas de gramicidina A, B y D, aunque también pueden dar lugar a una ordenación cíclica conformando la gramicidina S, constituida por 14 aminoácidos (Kessler et al., 2004). En la Tabla 1 se recoge la nomenclatura y la pérdida de peso observada en los fragmentos de péptidos o proteínas analizados por espectrometría cuando una masa específica es fragmentada y pierde un aminoácido. Generalmente esta pérdida de masa coincide con el peso molecular del aminoácido que se fragmente con pérdida de una molécula de agua (Gogichaeva et al., 2007).

Tabla 1

Pérdida de masa observada tras la pérdida de aminoácidos durante la fragmentación de moléculas complejas y su nomenclatura

Aminoácido	Nomenclatura	Pérdida de masa (Da)
Alanina	A	71
Arginina	R	156
Asparagina	N	114
Ácido aspártico	D	115
Cisteína	C	103
Ácido glutámico	E	129
Glutamina	Q	128
Glicina	G	57
Histidina	H	137
Isoleucina	I	113
Leucina	L	113
Lisina	K	128
Metionina	M	131
Fenilalanina	F	147
Prolina	P	97
Serina	S	87
Treonina	T	101
Triptófano	W	186
Tirosina	Y	163
Valina	V	99

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se recoge la secuencia general de la gramicidina A, B y D que difieren en el aminoácido definido como X o Y: L-X-Gly-L-Ala-D-Leu-L-Ala-D-Val-L-Val-D-Val-L-Trp-D-Leu-L-Y-D-Leu-L-Trp-D-Leu-L-Trp-. Así, en el caso de la gramicidina A, el aminoácido definido como Y suele ser el L-triptofano, mientras que en la gramicidina B y C este suele ser la L-fenilalanina o la L-tirosina, respectivamente. Además, las moléculas de gramicidina A, B y D pueden variar en el aminoácido definido como X, que puede estar constituido por valina o isoleucina dando lugar esta variación en la cadena de aminoácidos a distintas isoformas de la

gramicidina con ligeras variaciones en su peso molecular (Kessler et al., 2004). La forma cíclica de este antibiótico, conocido como gramicidina S, está conformada por dos secuencias de cinco aminoácidos (Val-Orn-Leu-D-Phe-Pro), dando lugar a un decapeptido, el cual está cargado de forma positiva debido al aminoácido ornitina. Por tanto, si se dividiese a la molécula de gramicidina S a la mitad, daría lugar a dos moléculas de pesos semejantes. La gramicidina S suele tener un peso molecular de 1141 o 1163 Da, dependiendo de las pérdidas de moléculas de agua sufridas durante su conformación, mientras que el peso molecular medio de la gramicidina A, C y D es de 1882 Da. La gramicidina S tiene una solubilidad muy baja en agua, ya que principalmente está constituida por aminoácidos de naturaleza hidrofóbica.

La gramicidina presenta un amplio espectro de actuación contra bacterias Gram positivas, pero no contra bacterias Gram negativas. Además, presenta una importante acción fungicida, siendo eficaz contra diversos hongos productores de diversas plagas en el sector agroalimentario. Tran et al. (2022) recogen información sobre la capacidad de *Aneurinibacillus migulanus*, también denominado *Bacillus Brevis* o *Anerurinibacillus aneuriniliticus*, para inhibir distintos tipos de bacterias y hongos, debido a la acción que ejerce la gramicidina S sobre la membrana plasmática de dichos microorganismos, dando lugar a la generación de poros que destruyen las propiedades de barrera de la membrana plasmática, además de inhibir la del ADN y el crecimiento celular.

Métodos de extracción y análisis de gramicidina

A diferencia de los biosurfactantes, la gramicidina no se puede detectar midiendo un parámetro físico como la tensión superficial del agua residual, sino que hay que analizar la presencia de compuestos con masas moleculares compatibles con la presencia de gramicidina. Entre estos métodos se encuentra la espectrometría de masas, entre la que se incluye la ionización por electrospray (ESI), o la desorción/ionización de masa por láser asistida por matriz (MALDI). Con ambas técnicas se puede detectar la presencia de masas moleculares compatibles con la gramicidina. La utilización de ESI implica la disolución del analito en un solvente que posteriormente es ionizado, formándose un aerosol de partículas cargadas en las que se puede detectar la masa del biocompuesto a analizar. En el espectro de masas, en este caso solo se observan las masas de los compuestos ionizados libres de solvente, el cual es evaporado durante el proceso de ionización. Por tanto, en este método el solvente no influye en gran medida en la detección de las masas del analito. Aun así, presenta el inconveniente que la muestra ionizada puede aparecer con varias cargas, lo que implica la aparición de masas moleculares menores en proporción al número de carga. En este caso, para calcular el peso molecular del

compuesto es necesario multiplicar la masa por el número de cargas. Una de las ventajas de este método es que la matriz o el solvente en el que se encuentra la muestra no aparece en el espectro de masas, y por tanto, su señal no interfiere en el análisis de los metabolitos. Además, atendiendo a la espectrometría de masas, la gramicidina también puede ser detectada utilizando MALDI. La muestra es mezclada con una matriz, como por ejemplo, el ácido α -ciano-4-hidroxicinámico (HCCA) no produciéndose señales del analito con distintas cargas, lo que da lugar a pesos y masas moleculares homogéneas. Sin embargo, tiene el inconveniente de que la matriz puede interferir en el análisis, sobre todo cuando presenta compuestos que tienen la misma masa que el analito en evaluación, interfiriendo en el análisis (Moldes et al., 2023).

En la mayoría de los casos, para que la señal de un antibiótico como la gramicidina pueda ser detectada por MS o por HPLC, es necesario someter a la corriente residual a varias etapas de purificación (Haggag, 2008; Berditsch et al., 2007). La gramicidina, es muy poco soluble en agua, pero puede ocurrir que los microorganismos excreten al medio sustancias biosurfactantes que produzcan la solubilización de la gramicidina en una fase acuosa. Así, López-Prieto et al. (2021) detectaron presencia de gramicidina S en un medio fermentado con *Aneurinibacillus aneurinilyticus*, tras la extracción de esta con PBS a partir de la biomasa centrifugada procedente de una corriente de la industria del maíz (llamada licores de lavado de maíz). Probablemente la presencia de gramicidina S en el medio acuoso se debió a la presencia de lipopéptidos con capacidad surfactante producidos por dichas bacterias que permitieron la extracción de la gramicidina S al medio acuoso. Una vez extraída la gramicidina S, la disolución acuosa puede ser dializada y liofilizada para su posterior análisis por MS. El protocolo establecido se aplica a los biosurfactantes adheridos a la membrana plasmática de la biomasa (Figura 5). Otros autores (Haggag, 2008) proponen el uso cromatografía fina de sílice y cromatografía líquida de alta resolución para la extracción e identificación de gramicidina a partir de medios fermentados de *Bacillus Brevis*.

Berditsch et al. (2007) realizaron la extracción intracelular de gramicidina en la biomasa centrifugada de un cultivo de *Aneurinibacillus migulanus* fermentado durante varias horas. Para ello, la biomasa microbiana productora de gramicidina fue resuspendida en NaCl 150 mM y HCl 20 mM a 80 °C durante 15 min con el fin de facilitar la extracción de la gramicidina, la cual se encuentra almacenada en unos sacos en forma de gránulos. Posteriormente, se diluyó la biomasa con etanol absoluto a una relación 1:1 (v/v) y se agitó durante 1 h a temperatura ambiente, para eliminar la biomasa microbiana mediante centrifugación y analizar el sobrenadante por HPLC.

Conclusiones

En lo que se refiere a la extracción de biosurfactantes a partir de corrientes residuales, existen distintos protocolos de actuación en función de si estos están adheridos a la membrana plasmática o son excretados de forma extracelular en la corriente residual. Así, para la recuperación de biosurfactantes extracelulares, se propone como métodos principales la precipitación y extracción con disolventes orgánicos; mientras que para los biosurfactantes adheridos a la membrana plasmática de los microorganismos, presentes en las corrientes residuales, se propone una extracción sólido-líquido con agentes extractantes basados en disoluciones tampón salinas. En cuanto a la purificación y análisis de estos biocompuestos, se recomienda la cromatografía y la espectroscopía de masas acoplada a cromatografía líquida de alta resolución como uno de los métodos más resolutivos. Aunque para una primera aproximación, y con el fin de conocer si una corriente residual puede presentar biosurfactantes extracelulares, bastaría con medir la tensión superficial de dicha corriente o la capacidad dispersante en un ensayo con agua y aceite.

Para extraer gramicidina a partir de la biomasa microbiana presente en una corriente residual, se propone una rotura de los sacos donde los microorganismos acumulan este antibiótico; la rotura puede ser de forma mecánica o mediante una hidrólisis química con el fin de liberar la gramicidina, y posteriormente extraerla con un disolvente orgánico, ya que esta no es soluble en agua. Para analizar la gramicidina, se recomienda la espectrometría de masas y/o cromatografía líquida de alta resolución.

Los procesos descritos en este capítulo promueven las metas fijadas en la Agenda 2030, y por tanto están en consonancia con el Objetivo 3 que promueve la salud y el bienestar, ya que recoge la producción de biosurfactantes que podrían ser utilizados para obtener formulaciones farmacéuticas y de cuidado personal más biocompatibles y biodegradables que sus homólogas a base de surfactantes sintetizados químicamente. Además, se promueve una producción y consumo responsable, acorde con el Objetivo 12 de la Agenda 2030, ya que la utilización de corrientes residuales de la industria agroalimentaria como fuente directa para la obtención de biosurfactantes y/o gramicidina promueve la economía circular y la sinergia entre las industrias del sector agroalimentario y las industrias del sector farmacéutico y cosmético.

Agradecimientos

Esta investigación ha contado con el apoyo del Ministerio Español de Ciencia e Innovación en el marco de los proyectos de I+D+i con las siguientes referencias: PID2021-122221OB-I00 y TED2021-129650B-I00.

Referencias

- Berditsch, M., Afonin, S., y Ulrich, A.S. (2007). "The ability of *Aneunnibacillus migulanus* (*Bacillus brevis*) to produce the antibiotic Gramicidin S is correlated with phenotype variation". *Applied and Environmental Microbiology*, 73(20), 6620-6628. <https://DOI.10.1128/AEM.00881-07>
- Bustos, G., Arcos, U., Vecino, X., Cruz, J. M., y Moldes, A. B. (2018). Recycled *Lactobacillus pentosus* biomass can regenerate biosurfactants after various fermentative and extractive cycles. *Biochemical Engineering Journal*, 132, 191-195. <https://DOI.org/10.1016/j.bej.2018.01.021>
- Chen, H. L., Chen Y. S., y Juang R. S. (2007). "Separation of surfactin from fermentation broths by acid precipitation and two-stage dead-end ultrafiltration processes". *Journal of Membrane Science*, 299(1), 114-121. <https://DOI.10.1016/j.memsci.2007.04.031>
- Dardouri, M., Mendes, R. M., Frenzel, J., Costa, J., y Ribeiro, I. A. C. (2021). "Seeking faster, alternative methods for glycolipid biosurfactant characterization and purification". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 413(16), 4311-4320. <https://DOI.10.5772/intechopen.104576>
- De Souza, C. G., Martins, F. I. C. C., Zocolo, G. J., Figueiredo, J. E. F., Canuto, K. M., y Sousa de Brito, E. (2018). Simultaneous quantification of lipopeptide isoforms by UPLC-MS in the fermentation broth from *Bacillus subtilis* CNPMS22. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 410, 6827-6836. <https://DOI.10.1007/s00216-018-1281-6>
- Gogichaeva, N., Williams, T., y Alterman, M. (2007). MALDI TOF/TOF Tandem Mass Spectrometry as a new tool for amino acid analysis. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 18(2), 279-284. <https://DOI.org/10.1016/j.jasms.2006.09.013>
- Haggag, W. M. (2008). Isolation of bioactive antibiotic peptides from *Bacillus brevis* and *Bacillus polymyxa* against *Botrytis grey* mould in strawberry. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 41(7), 477-491 <https://DOI.org/10.1080/03235400600833704>
- Jadhav, J., Dutta, S., Kale S., y Pratap, A. (2018). Fermentative production of rhamnolipid and purification by adsorption chromatography. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 48(3), 234-241. <https://DOI.10.1080/10826068.2017.1421967>
- Kessler, N., Schuhmann, H., Morneweg, S., Linne, U., y Marahiel, M. A. (2004). The linear pentadecapeptide gramicidin is assembled by four multimodular nonribosomal peptide synthetases that comprise 16 modules with 56 catalytic domains. *The Journal of Biological Chemistry*, 279(9), 7413-7419. <https://DOI.org/10.1074/jbc.M309658200>
- López-Prieto, A., Rodríguez-López, L., Rincón-Fontán, M., Cruz, J. M., y Moldes, A. B. (2021). Characterization of extracellular and cell bound biosurfactants produced by *Aneurinibacillus aneurinilyticus* isolated from commercial corn steep liquor. *Microbiological Research*, 242, 126614. <https://DOI.org/10.1016/j.micres.2020.126614>

- Moldes, A. B., Álvarez-Chaver, P., Vecino, X., y Cruz, J. M. (2023). Purification of lipopeptide biosurfactant extracts obtained from a complex residual food stream using Tricine-SDS-PAGE electrophoresis. *Frontieres in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1-12. <https://DOI.org/10.3389/fbioe.2023.1199103>
- Moldes, A. B., Vecino, X., Rodríguez-López, L., Rincón-Fontán, M., y Cruz, J. M. (2020). *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Microbial Biomolecules: Properties, Relevance, and Their Translational Applications. Biosurfactants: The use of biomolecules in cosmetics and detergents*. Ed Elsevier, 163-185. <https://DOI.org/10.1016/B978-0-444-64301-8.00008-1>
- Ostendorf, T. A., Silva, I. A., Converti, A., y Sarubbo L. A. (2019). Production and formulation of a new low-cost biosurfactant to remediate oil-contaminated seawater. *Journal of Biotechnology*, 295, 71-79. <https://DOI.10.1016/j.jbiotec.2019.01.025>
- Otoniel, J., Velásques, W., Chacón, Z., y Ball, M. (2015). Evaluación de la capacidad de ramnolípidos crudos para la remoción y emulsificación de hidrocarburos en un sistema modelo. *Ciencia*, 23(1), 39-50.
- Pal, Y., Mali, S., y Pratap, A. (2022). Optimization of the primary purification process of extracting sophorolipid from the fermentation broth to achieve a higher yield and purity. *Tenside Surfactants Detergents*, 59(5), 441-449. <https://DOI.10.1515/tsd-2022-2450>
- Pratap, A. P., Mestri, R. S., y Mali, S. N. (2021). Waste derived-green and sustainable production of Sophorolipid. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100209. <https://DOI.org/10.1016/j.crgsc.2021.100209>
- Rodrigues, L., Moldes, A., Teixeira, J., y Oliveira, R. (2006). Kinetic study of fermentative biosurfactant production by *Lactobacillus* strains. *Biochemical Engineering Journal*, 28(2), 109-116. <https://DOI.org/10.1016/j.bej.2005.06.001>
- Rodríguez-López, L., Rincón-Fontán, M., Vecino, X., Cruz, J. M., y Moldes, A. B. (2020). Extraction, separation, and characterization of lipopeptides and phospholipids from corn steep water. *Separation and Purification Technology*, 248(1), 117076. <https://DOI.org/10.1016/j.seppur.2020.117076>
- Rodríguez-López, L., Rincón-Fontán, M., Vecino, X., Cruz, J. M., y Moldes, A. B. (2018). Biological surfactants vs. polysorbates: Comparison of their emulsifier and surfactant properties. *Tenside Surfactants Detergents*, 55(4), 273-280. <https://DOI.10.3139/113.110574>
- Tang, Y., Ma, Q., Du, Y., Ren, L., Van Zyl, L. J., y Long, X. (2020). Efficient purification of sophorolipids via chemical modifications coupled with extractions and their potential applications as antibacterial agents. *Separation and Purification Technology*, 245(15), 116897. <https://DOI.10.1016/j.seppur.2020.116897>

- Tran, C., Cock, I. E., Chen, X., Feng, Y. (2022). Antimicrobial *Bacillus*: Metabolites and Their Mode of Action. *Antibiotics*, 11(1), 882022. <https://DOI.10.3390/antibiotics11010088>
- Vecino, X., Bustos, G., Devesa-Rey, R., Cruz, J. M., y Moldes, A. B. (2015). Salt-free aqueous extraction of a cell-bound biosurfactant: A kinetic study. *Journal of Surfactants and Detergents*, 18(2), 267-274. 18:267-274. <https://DOI.10.1007/s11743-014-1637-7>
- Yu, F., Du, Y., Deng, S., Jin, M., Zhang, D., Zhao, M., Yin, J., y Long, X. (2023). Efficient preparation of extremely high purity surfactin from fermentation broth by ethanol extraction. *Separation and Purification Technology*, 304(1), 122278. <https://DOI.10.1016/j.seppur.2022.122278>
- Zdziennicka, A., Krawczyk, J., y Jańczuk, B. (2018). Volumetric properties of rhamnolipid and surfactin at different temperatures. *Journal of Molecular Liquids*, 255(1), 562-571. <https://DOI.org/10.1016/j.molliq.2018.02.015>

Capítulo 7

Frutos de cactáceas como fuentes alternativas para la extracción de compuestos biofuncionales: betalainas *Cactus fruits as alternative sources for the extraction of biofunctional compounds: betalains*

Clara Cervantes Arista

*Daniel Trujillo-Ramírez

Rosa Elena Salazar Lopez¹

Resumen

Las cactáceas son nativas del continente americano, crecen bajo condiciones poco favorables en regiones áridas y semiáridas. Algunas especies de cactáceas presentan frutos de diversos colores, como rojo brillante, amarillo/naranja y púrpura. Estos colores vibrantes son consecuencia de un grupo de compuestos nitrogenados e hidrosolubles conocidos como betalainas. Estos pigmentos, más allá de su uso en la industria alimentaria para conferir color, son compuestos funcionales debido a su destacada capacidad antioxidante, la cual se ha relacionado con una serie de propiedades farmacológicas, tales como la prevención de enfermedades cardiovasculares, propiedades quimioprotectoras, efectos anticancerígenos, propiedades antimicrobianas, beneficios en la regulación de lípidos, efectos antiinflamatorios y su capacidad para controlar los niveles de glucosa en sangre. Actualmente, la principal fuente de obtención de betalainas es el betabel (*Beta vulgaris*), sin embargo, se reportan algunas limitantes sensoriales y microbiológicas, por lo que se está en la búsqueda de nuevas fuentes para su obtención. Los frutos de cactáceas se están perfilando como una de las fuentes más prometedoras debido al alto contenido de estos pigmentos, menor complejidad de extracción asociada a la matriz, así como también a la baja inversión requerida para su cultivo, por ser plantas que crecen principalmente de forma silvestre. En este capítulo se busca situar a los frutos de cactáceas como fuente prometedora de obtención de betalainas.

¹ Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Blvd. E. Cárdenas González 1201 Pte. Col. Jardín Cd. Mante, Tam.

*Autor de correspondencia: daniel.trujillo@uat.edu.mx

Summary

Cacti are native to the American continent, growing under unfavorable conditions in arid and semi-arid regions. Nevertheless, some species of cacti have fruits of different colors such as scarlet, yellow-orange, and purple. These vibrant colors are the result of a group of nitrogenous and water-soluble compounds known as betalains. Besides being marketed for dyeing, they have been classified as functional compounds for their high antioxidant capacity, associated with pharmacological activities such as chemoprotective, anticancer, antimicrobial, antilipidemic and anti-inflammatory. Nowadays, the main source of betalains is the beetroot (*Beta vulgaris*), however, some sensory and microbiological limitations are reported. Hence, new sources to obtain betalains are constantly being researched. In this sense, cacti are emerging as one of its most promising sources, due to their high content of pigments, less extractive complexity associated to the matrix, as well as, the low levels of investment required for farming, as those plants mainly grow wild. Therefore, this chapter aims to place the cacti fruits as a promising source of betalains.

Introducción

Las betalaínas son compuestos químicos nitrogenados e hidrosolubles que se han empleado en la industria alimentaria como colorantes naturales en una variedad de productos en los que se incluyen productos cárnicos (salchicha), alimentos congelados y productos lácteos (EFSA, 2015). Sin embargo, su potencial se extiende más allá de la industria alimentaria, ya que se están explorando sus aplicaciones en el área farmacológica y cosmética. Estos pigmentos han ganado relevancia por encontrarse en fuentes naturales y presentar efectos benéficos para la salud.

Hasta ahora, la principal fuente para la obtención de betalaínas es el betabel (*Beta vulgaris*). Sin embargo, presenta algunas desventajas, ya que por ser un bulbo que crece bajo el suelo presenta alta carga microbiana, imparte un sabor terroso, además del contenido de nitratos que aún es un tema en discusión (Stintzing y Carle, 2007; Polturak y Aharoni, 2018). Algunas investigaciones han expuesto distintas fuentes alternativas para la obtención de estos pigmentos (Polturak y Aharoni, 2018; Khan y Giridhar, 2015). Dentro de las especies con mayor relevancia están las pertenecientes a la familia de las cactáceas, que se han perfilado como la principal alternativa para la extracción de betalaínas, estas especies presentan varias ventajas, ya que crecen en climas con bajas precipitaciones, en suelos áridos y/o semiáridos, no requieren técnicas de manejo arduas e incluso la mayoría de ellas se mantienen de forma silvestre en campos abiertos.

Uno de los géneros más estudiados es *Opuntia*, *Hylocereus* y *Stenocereus*, cuyos frutos son conocidos como tuna, pitahaya y pitaya, respectivamente, sin embargo, a los frutos de esta última también se les suelen nombrar como tunillos o frutos de xoconostle (Flores et al., 2011). De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en el 2022 se estimó una superficie sembrada de tuna de 45 033.88 ha, y una producción de 444 080.55 ton equivalente a 1 671 890.32 miles de pesos. Para pitahaya se reportó una superficie sembrada de 2386.18 ha, producción de 14 895.20 ton y un valor de producción de 245 607.59 miles de pesos. Y finalmente para pitaya, la superficie reportada fue de 177.69 ha, cuya producción fue de 5190.69 ton y un valor de producción de 105 349.00 miles de pesos. En comparación con la principal fuente de obtención de betalaínas: el betabel (superficie sembrada, 919.26 ha, producción, 18 158.80 ton, valor de producción, 105 424.84 miles de pesos). La relación entre la producción y el valor de producción no es muy diferente a las relaciones obtenidas con los datos de cactáceas, y es posible que esta diferencia se contrarreste mejorando las prácticas de pre y poscosecha para los frutos de estas especies prometedoras.

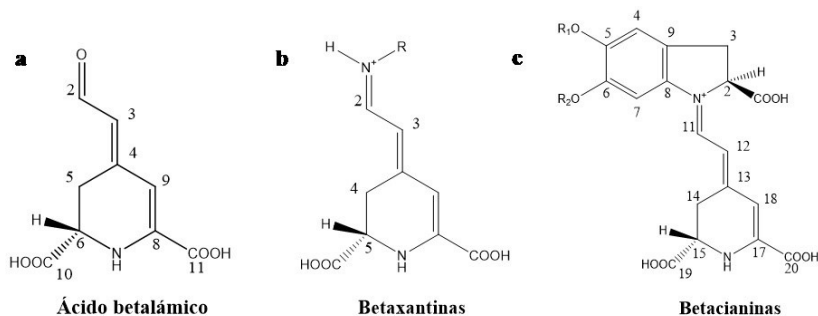
Diversos autores han categorizado a los frutos de ciertas especies de cactáceas (*Escottrilla chiotilla*, *Hylocereus* spp., *Myrtillocatus* spp., *Opuntia* spp. *Stenocereus* spp.) como fuentes prometedoras por su alto contenido de estos compuestos, que además de impartir color presentan propiedades farmacológicas (Ramírez-Rodríguez et al., 2020; García-Cruz et al., 2016; Pérez-Loredo et al., 2016; Cervantes-Arista et al., 2020). Es importante ampliar la información sobre las cactáceas como una fuente adicional para la extracción de estos compuestos bioactivos: las betalaínas. Por lo tanto, en este capítulo se abordarán algunos aspectos relevantes sobre las betalaínas, entre ellas su estructura, ruta biosintética, efectos farmacológicos, y se expondrán a los frutos de cactáceas como una fuente alternativa para la obtención de estos pigmentos.

Estructura

Tanto las betaxantinas como las betacianinas presentan una estructura central en común: el ácido betalámico 4-(2-oxo-etilidén)-1,2,3,4-tetrahidro-piridín-2,6-dicarboxílico]. Al cual se unirán el ciclo-DOPA (ciclo-3-(3,4-dihidroxifenil-alanina)) y sus derivados glucosilados para formar las betacianinas, aminas o aminoácidos para la formación de betaxantinas (Khan y Giridhar, 2015; Polturak y Aharoni, 2018) cuyas estructuras base se muestran en la Figura 1. La diversidad de las betacianinas deriva de los sustituyentes del grupo R del ciclo DOPA, y para las betaxantinas dependerá del tipo de aminoácido o amina que se una al ácido betalámico (Belhadj et al., 2017).

Figura 1

a) Estructura del ácido betalámico, b) estructura de las betaxantinas y c) estructura de las betacianinas



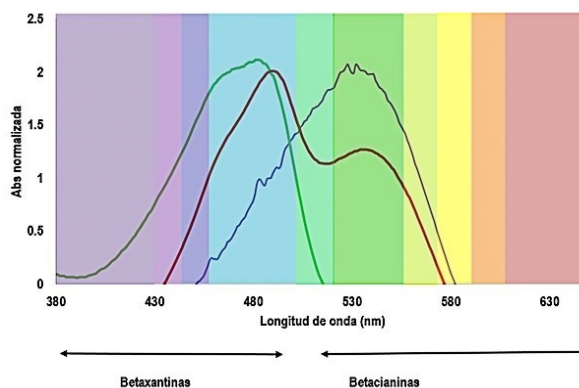
Fuente: adaptado de Herbach et al. (2006); Khan y Giridhar (2015); Belhadj-Slimen et al. (2017).

Las betacianinas (Griego: *Kyaneos* = azul) imparten tonalidades de rojo a violeta, las longitudes de excitación máxima corresponden a la región verde del espectro electromagnético y es medible entre 506 y 660 nm. Las betaxantinas (Griego: *Xanthos* = amarillo) tienen su máxima absorbancia entre 320 y 475 nm correspondientes a la zona azul del espectro. La longitud máxima de absorción de las betacianinas y betaxantinas puede variar dependiendo del solvente con que fueron obtenidas (Khan y Giridhar, 2015; Belhadj et al., 2016).

Un esquema de los perfiles de absorción de las betalainas se presenta en la Figura 2; se muestran los espectros de absorción de las betalainas presentes en los frutos de pitayo de la especie *Stenocereus stellatus*, cuyos colores son diversos: amarillos, púrpura y rojos. Los frutos amarillos presentan en su mayoría betaxantinas, los frutos púrpuras betacianinas y los frutos de color rojo en proporción betacianinas/betaxantinas de 45:55 (Cervantes-Arista et al., 2020). Se puede observar, tal como se reporta en el trabajo de Belhadj et al. (2017), Khan y Giridhar (2015) y Cervantes-Arista et al. (2020), que las longitudes de excitación máxima de las betacianinas corresponden a la región verde del espectro de absorción (espectro púrpura) y las betaxantinas en la región azul (espectro de color naranja). Las regiones de color de la Figura 2 se simulan a las ya reportadas en trabajos previos, como el de Zamanian y Hardiman (2005) y Austin et al. (2021).

Figura 2

Espectro de absorción de las betacianinas (región azul) y betaxantinas (región verde)



Fuente: elaboración propia.

Los pigmentos naturales, al clasificarse basados en su estructura, se dividen en seis grupos: tetrapirroles, tetra-terpenoides, quinonas, O-heterocíclicos, N-heterocíclicos y metalo-proteínas. Las betalaínas se encuentran en el grupo de compuestos N-heterocíclicos (Hendry y Houghton, 1996). Esto permite que las betalaínas tengan propiedades hidrosolubles y puedan ser extraídas principalmente en solventes polares como agua, etanol y metanol (Tiwari y Cullen, 2013). Dentro de las betalaínas está el grupo de las betacianinas, las cuales, de acuerdo con su estructura, se pueden dividir en 4 grupos: betanina, gonferina, amarantina y bouganvilina, estos grupos se diferencian por la unión de grupos glucosilo a los átomos de oxígeno en la posición orto del resto del ciclo-DOPA (Steglich y Strack, 1990). Por otra parte, las betaxantinas más estudiadas se encuentra la indixantina, principal pigmento asociado a los tonos amarillo presente en especies de *Opuntia* y la vulgaxantina I, la más abundante en la especie *Beta vulgaris* (Stintzing et al., 2002).

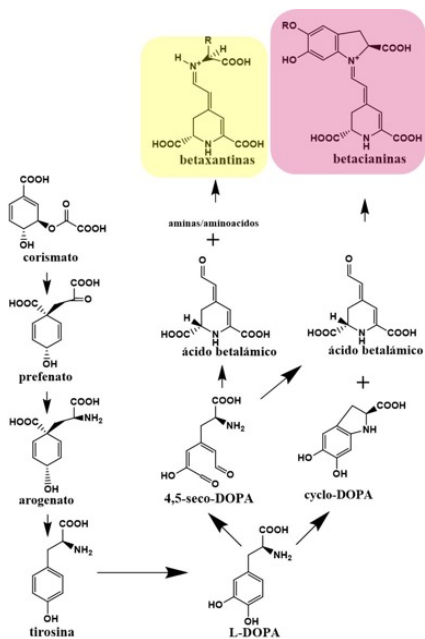
Ruta biosintética

Las betalaínas son compuestos químicos para las cuales aún no se define con exactitud si solo son almacenadas en las vacuolas o se sintetizan en ese sitio (Shetty et al., 2013), su precursor es L-tirosina sintetizada en la ruta del ácido shikimico (Herrmann, 1995). El primer paso en la ruta biosintética de las betalaínas comienza con la enzima citocromo P450 que cataliza la reacción de hidroxilación de la tirosina, generando L-3, 4-dihidroxi fenilalanina (L-DOPA), el paso siguiente es catalizado por la enzima 4,5-DOPA-extradiol-dioxigenasa (4,5-DOPA) formando

el intermediario 4, 5-seco-DOPA que espontáneamente se cicla para formar el ácido betalámico (Gandía-Herrero y García-Carmona, 2013; Polturak y Aharoni, 2018; Henarejos-Escudero et al., 2021), el cual es precursor de las betacianinas y betaxantinas. Para la síntesis de las betacianinas, el ácido betalámico se condensa con el ciclo-DOPA el cual se forma a partir del L-DOPA (Schenck y Maeda, 2018). Por otra parte, la síntesis de las betaxantinas comienza con la condensación del ácido betalámico con ciertas aminas o aminoácidos para formar la diversidad de betaxantinas (Gandía-Herrero y García-Carmona, 2013) (Figura 3).

Figura 3

Ruta de síntesis de betalainas y betaxantinas



Fuente: Adaptado de Khan y Giridhar (2015) y Schenck y Maeda (2018).

Importancia farmacológica de las betalainas

Las plantas de cactáceas, así como sus frutos, sintetizan una variedad de metabolitos secundarios con el propósito de protegerse frente a plagas, insectos, factores ambientales y daños físicos. Sin embargo, su importancia farmacológica radica en su diversidad de efectos bioactivos, como se ha destacado en estudios previos (Hadipour et al., 2020; Sadowska-Bartosz y Bartosz, 2021).

Las cactáceas, desde la Antigüedad, han desempeñado un papel importante en rituales con propósitos terapéuticos. En la actualidad, se cuenta con un mayor entendimiento de los compuestos bioactivos presentes en estas plantas, que son responsables de sus propiedades farmacológicas. En la exhaustiva revisión de Ramírez-Rodríguez et al. (2020) se destacan algunos de los efectos farmacológicos vinculados a estos compuestos, entre los cuales se incluyen, compuestos fenólicos, alcaloides, pectinas, ácidos grasos, flavonoides, esteroides, y, en particular, las betalainas que constituyen el foco central de nuestro estudio.

Las betalainas, como compuestos bioactivos, han sido objeto de atención en diversas investigaciones debido a su relevancia como estabilizadores de especies reactivas de oxígeno o nitrógeno (ERON) (Choo, 2018; Coy-Barrera, 2020). Esto ha impulsado la investigación y divulgación de sus efectos bioactivos, particularmente su capacidad para donar electrones y protones con el fin de estabilizar este tipo de moléculas (ERON), así como su intervención en la regulación de ciertos genes que codifican proteínas involucradas en la defensa contra el estrés oxidativo (Silva et al., 2020). A estos pigmentos se les ha atribuido una serie de efectos farmacológicos significativos asociados con su capacidad antioxidante, entre ellos la prevención de enfermedades cardiovasculares, su potencial como agentes antiinflamatorios, quimioprotectores, anticancerígenos, antimicrobianos, así como su relevancia en el control de los niveles de glucosa capilar, como han señalado estudios recientes (Choo, 2018; Coy-Barrera, 2020; Silva et al., 2020; Dhananjayan et al., 2017; Hadipour et al., 2020; Madadi et al., 2020).

Silva et al. (2020) reportan que el 50 % de la ingesta oral de betanina resiste las condiciones ácidas del sistema digestivo, y un 65 % es capaz de migrar a las células epiteliales del intestino delgado, manteniendo su forma activa, es decir, su habilidad de estabilizar radicales libres. Se describe que la actividad antioxidante de la betanina está en función de su estructura química, presentando una mayor actividad a pH superiores a 4 (estructura desprotonada en el carbono 2, 15 y 17), y al pasar al torrente sanguíneo a través del sistema digestivo hasta el intestino delgado, la betanina mejora su habilidad para estabilizar radicales libres asociados al cambio que presenta su estructura (todos sus grupos carboxilo desprotonados, así como el hidroxilo del anillo fenólico). Las enfermedades cardiovasculares (ECV) son la principal causa de muerte en el mundo, se estimó en el 2015 que las ECV fueron las responsables del 30 % de las muertes a nivel mundial. Las ECV son un grupo de desórdenes del corazón y de los vasos sanguíneos que incluyen: la cardiopatía, enfermedades cerebrovasculares, arteriopatías y cardiopatías, entre otras (OMS, 2017). Cuando el flujo sanguíneo se ve interrumpido por la formación de agregados (células inflamatorias e inmunes, plaquetas, lípidos oxidados y células

del músculo liso), se propicia el desarrollo de las ECV. Esta acumulación puede verse favorecida por la presencia de radicales libres que promueven la peroxidación de ácidos grasos, el aumento en su densidad y carga, así como una disminución de ácidos poliinsaturados, provocando un cambio en la actividad migratoria de las células que terminan adheridas al endotelio, influyendo de forma negativa sobre la acción vascular (Silva et al., 2020). Por lo cual la importancia de las betalaínas como agentes antioxidantes, que son capaces de estabilizar a las ERO, como los peroxinitratos (ONOO^-) y radicales hidroxilos ($\text{OH}^\bullet$), ya sea cediendo sus protones (^+H) o electrones (e^-) (Silva et al., 2020).

De acuerdo con la revisión de Hadipour et al. (2020), el mecanismo propuesto responsable de los efectos antiinflamatorios de las betalaínas está asociado con el NF- κ B (factor de transcripción que regula genes implicados en procesos inmunes e inflamatorios), que reduce los mediadores inflamatorios, como citocinas y quimiocinas, así como células fagocíticas. Además, las betalaínas disminuyen los factores preinflamatorios, como las citoquinas, TNF- α y IL-6 (Kaur et al., 2018).

IKapadia et al. (2003) reportan que la ingesta de dosis de betanina al 0.0025% inhibió la incidencia, como la multiplicidad de tumores hepáticos, pero además observaron efectos positivos en modelos de cáncer de piel en ensayos con ratones. Hadipour et al. (2020) mencionan que la betanina induce la apoptosis (muerte celular programada). Madadi et al. (2020) reportan que extractos de betalaína de pitahaya roja ejercieron una actividad antimicrobiana, previniendo el crecimiento de bacterias Gram positivas (*Escherichia faecalis*, *B. cereus*, *Listeria monocytogenes* y *S. aureus*) y Gram negativas (*E. cloacae*, *Proteus vulgaris*, *Proteus mirabilis*, *P. aeruginosa*, *Salmonella typhi* Ty2, *Yersinia enterocolitica*, *Klebsiella pneumonia*, *Enterobacter aerogenes* y *E. coli*), así como ciertos tipos de mohos (*Aspergillus flavus*, *Cladosporium herbarium*, *Fusarium oxysporum* y *Botrytis cinerea*). Estos autores mencionan que la actividad antimicrobiana podría atribuirse a un cambio en la función, estructura y penetración de la membrana celular microbiana, provocando su muerte celular.

Otro de los efectos que se les atribuye a las betalaínas es la capacidad para disminuir los niveles de glucosa en sangre (Dhananjayan et al., 2017; Hadipour et al., 2020; Madadi et al., 2020; Sadowska-Bartoszyk y Bartoszyk, 2021). Se han realizado estudios tanto *in vitro* como *in vivo* partiendo de extractos, jugo, pulpa y betalaínas aisladas de betabel y algunos frutos de cáctaceas. Lugo-Radillo et al. (2012) reportan que la administración oral de betanina (9.6 mg) aislada de frutos de pitaya de la especie *Hylocereus ocamponis* en ratones BALB/c por 40 días, redujo la glicemia en un 50% comparado con el control positivo (sin administrar betanina). Dhananjayan et al. (2017) evaluaron la administración de betanina comercial en ratas Wistar diabetizadas, se reportó que la administración de esta betalaína

moduló el metabolismo de los carbohidratos y presentó efectos en la homeostasis de la glucosa. Además, reportan que la administración de betanina no afectó los niveles de glucosa en ratas sanas. Cervantes-Arista et al. (2020), en su ensayo *in vivo* utilizando ratas Wistar macho sanas, evaluaron el efecto antihiper glucemiante de las pulpas de los frutos rojos, blancos, púrpura y naranja de la especie *Stenocereus stellatus*. Los resultados indicaron que la variante roja en una dosis de 100 mg/kg de liofilizado de pulpa presentó un efecto similar al del fármaco comercial metformina, que se utiliza para controlar los niveles de glucosa en sangre. Hadipour et al. (2020) reportan que uno de los posibles mecanismos para la disminución de los niveles de glucosa en sangre, es la inhibición de la vía por la cual se absorbe la glucosa en el intestino. También se menciona la posibilidad de fomentar la producción de células productoras de insulina. Aunque esta información ha expuesto algunas de las posibles propiedades farmacológicas de las betalainas de cactáceas, aún existe un amplio campo de investigación por explorar, ya que todavía se tiende a centrar la atención en las betalainas obtenidas del betabel.

Principales fuentes de obtención de las betalainas

La especie *Beta vulgaris* es la principal fuente para la obtención de betalainas y, hasta ahora, la única fuente de extracción de betalainas para el colorante natural identificado como E-162 en la Unión Europea (Amchova et al., 2015). Sin embargo, Polturak y Aharoni (2018) y Stintzing y Carle (2007) describen desventajas de usar esta especie como fuente de obtención, ya que presenta una alta carga microbiana por crecer en el suelo, también se reportan desventajas en el aspecto sensorial, como olores desagradables, principalmente olores terrosos, por la presencia de geosmina (compuesto sintetizado por *Streptomyces coelicolor* y algunas cianobacterias). También se menciona la presencia de nitratos, cuyo efectos -negativos o positivos- son aún discutidos.

Por estas razones se ha ampliado la búsqueda de fuentes alternativas para la extracción de betalainas. Estos pigmentos se sintetizan en casi todas las familias del orden de las Caryophyllales, excepto para las familias Molluginaceae y Caryophyllaceae (Polturak y Aharoni, 2018). En la Figura 4 se muestran algunas de las familias donde se ha reportado la presencia de betalainas (Hussain et al., 2018). Amaranthaceae y Celosia también se han expuesto como fuentes de betalainas, sin embargo, la presencia de saponinas y un alto contenido de dopamina presentes en Amaranthaceae y Celosia, respectivamente, podría convertirse en una limitante para ser fuentes de betalainas para uso en la industria alimentaria por sus posibles propiedades toxicológicas. Los frutos de algunas especies de cactáceas han mostrado relevancia, ya que no se ha encontrado algún aspecto limitante para

la extracción de estos pigmentos, dentro de las especies más prometedoras como fuentes alternativas están, los frutos de las especies de *Opuntia*, *Hylocereus* y algunas de *Mammillaria* (Stintzing y Carle, 2004; Polturak y Aharoni, 2018), pero también las especies de *Stenocereus* spp. se están perfilando como fuente para la extracción de estos compuestos con actividad tintórea y farmacológica (García-Cruz et al., 2017; Cervantes-Arista et al., 2020).

Figura 4

Fuentes de betalainas



Fuente: elaboración propia.

Las cactáceas como una fuente alternativa para la extracción de compuestos de interés industrial: betalainas

Las cactáceas se clasifican dentro de la división; Magnoliophyta, clase; Magnoliopsida, orden; Caryophyllales y familia; Cactaceae (Guzmán et al., 2007). Son nativas del continente americano, se encuentran distribuidas desde Canadá hasta el estrecho de Magallanes en América del Sur. (Bravo-Hollis y Sanchez-Mejorada, 1991); crecen principalmente de forma silvestre en regiones áridas y semiáridas con bajas precipitaciones. En México, Estados Unidos, España, Italia y el Norte de África, las cactáceas forman parte importante de la dieta (Shetty et al., 2012).

Las cactáceas presentan ciertas ventajas con respecto a otras familias de plantas (metabolismos C3 y C4), por ejemplo, estas al tener un (Metabolismo ácido de las crasuláceas, por sus siglas en inglés) les permite crecer en climas áridos con bajas precipitaciones ya que almacenan gran cantidad de agua al abrir sus estomas (estructuras que permiten a la planta el intercambio de gases con el medio ambiente) por la noche para la incorporación de CO₂ y la formación de malato, el cual es asimilado en la etapa de luz para su conversión en carbohidratos (Rebollar y

Sancho, 2010). Otra ventaja es que su reproducción suele ser tanto de forma sexual como asexual o vegetativa, siendo esta última la principal forma de reproducción, y para la cual el tiempo de crecimiento de la planta y frutos suele ser menor que al reproducirse de forma sexual, según lo reportado por los mismos productores. Además, las cactáceas se encuentran en su mayoría de forma silvestre, por lo que no requieren de un manejo extenuante; sin embargo, se ha buscado mejorar sus rendimientos de producción como la calidad del fruto a través de una selectividad del tamaño, color, acidez y dulzor implementando mejoras en las condiciones de cultivo en huertas familiares y plantaciones.

Las especies del género *Stenocereus* son cactus columnares arbóreos cuyo número de costillas varía según la especie, suelen tener de 8 a 12 para la especie *stellatus*, *griseus* y *pruinus*. Sus flores suelen ser de color rosa pálido, color crema o blanco. Sus frutos suelen crecer en sus laterales y en la parte superior de sus tallos (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991). Las especies de *Opuntia* presentan tallos planos llamados cladodios, sus flores son de diversos colores, amarillas, rosadas, rojas, naranjas y blancas. *Hylocereus* presenta especies trepadoras de tallos delgados cuyos frutos son de mayor tamaño al compararse con los que producen los géneros de *Opuntia* o *Stenocereus*. En las Figuras de la 5 a 7 se muestran algunas de las características morfológicas de la planta, flor y frutos de algunas de las especies de cactáceas más estudiadas como fuentes prometedoras de betalainas (*Stenocereus* y *Opuntia*).

Figura 5

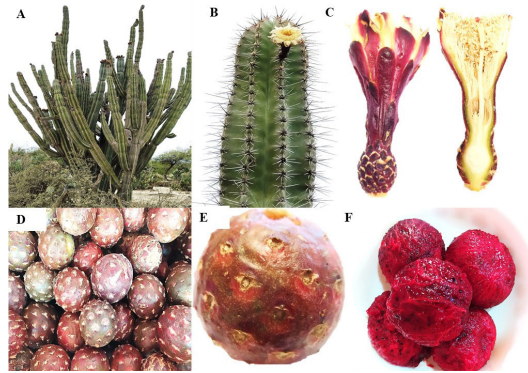
Stenocereus stellatus, A) Planta, B y C) Flores, D y E) Frutos maduros, F) Pulpa



Fuente: fotografías tomadas por el autor.

Figura 6

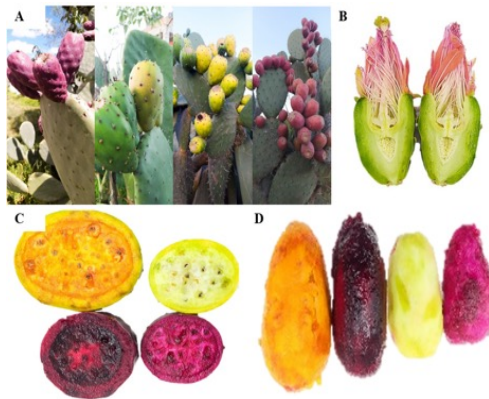
Stenocereus spp., A) Planta, B) Flor, C) Corte longitudinal de la flor, D) y E) Frutos maduros, F) Pulpa



Fuente: Fotografías tomadas por el autor.

Figura 7

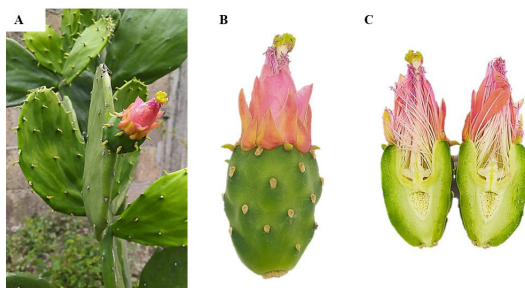
Opuntia spp., A) Planta con frutos maduros, B) Corte longitudinal de la flor, C) Corte transversal de los frutos, D) Pulpa



Fuente: fotografías tomadas por el autor.

Figura 8

Opuntia spp. A) Planta, B) Flor con fruto, C) corte longitudinal de la flor con fruto



Fuente: Fotografías tomadas por el autor.

En las cactáceas, una de las partes más consumidas son sus frutos, que se destacan por su amplia variedad de colores, los cuales son el resultado de la presencia de betalainas. Los frutos de cactáceas se están perfilando como una importante fuente para la obtención de betalainas por su alto contenido de estos pigmentos. Algunas de las investigaciones reportan concentraciones de 66 a 1140 mg/kg de fruta fresca para frutos de tuna (Moßhammer et al., 2006). Guzmán-Maldonado et al. (2010) reportan concentraciones en especies de *Myrtillocactus* de 32.39 a 39.31 mg/kg de fruto fresco. En las Tablas 1 y 2 se presentan investigaciones sobre las tres especies de cactáceas con mayor importancia económica asociada a la producción de sus frutos; *Stenocereus*, *Hylocereus* y *Opuntia* (Bravo-Hollis y Sánchez-Mejorada, 1991). Aún no se conocen con precisión las mejores condiciones para la extracción de estos compuestos, sin embargo, se reporta que los principales factores que influyen durante la extracción de estos pigmentos es el tipo de solvente, cuyos solventes polares como agua, etanol y metanol se han recomendado para la extracción por la afinidad con las características hidrofílicas de las betalainas (Sanchez-Gonzalez et al., 2013; Maran y Priya, 2016; Kushwaha et al., 2018). Además, el pH influye en el proceso de extracción (Sanchez-Gonzalez et al., 2013). Resulta relevante identificar el efecto de los factores que influyen durante el proceso de extracción de las betalainas en frutos de cactáceas.

Las especies del género *Stenocereus* están ganando relevancia; en las últimas décadas, las publicaciones sobre estas cactáceas se han enfocado en su caracterización química y compuestos bioactivos. Dentro de estas publicaciones, Pérez-Loredo et al. (2016) analizaron frutos de la especie *Stenocereus stellatus* blancos, amarillos, púrpura y rojos; reportan que los frutos rojos presentaron las concentraciones más altas, seguidos por los amarillos y púrpuras.

García-Cruz et al. (2016) y Cervantes-Arista et al. (2020) reportan que los frutos de color rojo de *Stenocereus stellatus* representan una fuente importante para la extracción de betalainas por su alto contenido de estos pigmentos, que además se asocia con su alta capacidad antioxidante (22-33 mg ET/g peso fresco) comparada con frutos considerados con la mayor capacidad antioxidante; las bayas (250-1250 mg ET/kg peso fresco), principalmente arándanos, frambuesas, fresas y zarzamoras (Yang y Choi, 2017). Por lo tanto, es importante seguir desarrollando investigaciones que permitan conocer más sobre las betalainas en los frutos de cactáceas.

Tabla 1

Betalainas totales en frutos del género Stenocereus spp. y Hylocereus spp.

Fuente/especie	<i>Stenocereus</i>				<i>Hylocereus</i>			
	<i>stellatus</i>	<i>griseus</i>	<i>pruinus</i>	<i>thurberi</i>	<i>polyrhizus</i>	<i>Sp. 487</i>	<i>purpusii</i>	<i>constaricensis</i>
°Pérez-Loredo et al. (2016)	2.97 *							
(mg/g peso seco)	1.06**							
	0.86***							
°García-Cruz et al. (2016)	0.57*		0.56*					
(mg/g peso fresco)	0.01****		0.42**					
°García-Cruz et al. (2012)		3.47*						
(mg/g peso seco)		2.15**						
°García-Cruz et al. (2013)			6.07*					
(mg/g peso seco)			3.14**					
°°García-Cruz et al. (2017)	24.21*		23.13*					
(mg/g peso seco)			22.22**					
°Cervantes-Arista et al. (2020)	0.38*							
(mg/g peso fresco)	0.02**							
	0.06***							
	0.00****							
°°Cejudo-Bastante et al. (2019) (mg/g peso seco)		4.87						
°Castro-Enríquez et al. (2020) (mg/g)				2.1 *				
°Wybraniec y Mizrahi (2002) (mg/g)					0.28	0.3	0.23	0.39

*Frutos rojos, **amarillos/naranjas, ***púrpuras, ****blancos. Técnica de cuantificación;

°espectrofotometría, °°HPLC.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2
Betalainas totales en frutos del género Opuntia

Fuente/cultivar	Opuntia					<i>Opuntia ficus-indica</i> y <i>Opuntia robusta</i>					Opuntia ficus-indica			
	Camuesa	Roja Pelota	Cardona	Liria	Roja Lisa	Naranjona	Reyna	Meyers (rosa)	Ofer (naranja)	Nudosa (roja)	Roja	Púrpura	Anarilla/naranja	
Mondragon-Jacobo et al. (2009) (mg/g pulpa seca)	8.15	3.04	3.08	0.5	0.5	0.23	0.17							
de Wit et al. (2019) (mg/g fruta)								0.0046	0.002	0.006				
Celli y Brooks (2017) (mg/g peso fresco)											0.1	0.3	0.4	
Koss-Mikołajczyk et al. (2019) (mg/g peso seco)											2.87		4.9	
Smeriglio et al. (2019) (mg/g de extracto seco)											157.4		101.3	

Fuente: elaboración propia.

Expectativas

Las betalainas son de los pigmentos naturales menos estudiados, en comparación con los carotenoides, clorofilas y antocianinas, estos últimos también hidrosolubles que presentan una gran similitud a las tonalidades a determinado pH con las betalainas. Pero las betalainas están ganando relevancia por sus propiedades tintóreas, su alta capacidad antioxidante y los efectos farmacológicos que se le asocian. A pesar de ello, la única fuente autorizada para la extracción de estos pigmentos es la especie *Beta vulgaris*; sin embargo, ya se han expuesto sus limitaciones, por lo que los frutos de cactáceas se están perfilando como una fuente alternativa para la extracción de estos compuestos, no solo por su alta concentración sino por la selectividad biológica natural tanto de las betacianinas como de las betaxantinas. Aún es necesario adentrarse en aspectos asociados a la extracción, identificación y estabilización de betalainas obtenidas de frutos de cactáceas para incrementar la posibilidad de que en un futuro estas plantas puedan ser fuente oficial para la extracción de betalainas.

Conclusiones

En un futuro, los frutos de cactáceas pueden convertirse en una de las fuentes importantes para la extracción de betalainas, sin embargo, aún existe un arduo camino por investigar para cubrir distintos aspectos enfocados a maximizar la obtención de estos pigmentos; como por ejemplo, el análisis de los factores, técnicas de extracción y la identificación de los perfiles de betalainas. Dentro del gran grupo de especies que engloba a las cactáceas, las especies de *Stenocereus* spp. (pitayas), *Opuntia* spp. (tunas) e *Hylocereus* spp. (pitahayas) se están perfilando como los géneros más prometedores para la extracción de betalainas. Sin embargo, resulta relevante la incursión en otras especies poco conocidas que también pudieran ser fuentes importantes de extracción de estos compuestos biofuncionales.

Referencias

- Amchova, P., Kotolova, H., y Ruda-Kucerovala, J. (2015). Health safety issues of synthetic food colorants. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(3), 914-922.
- Austin, E., Geisler, A. N., Nguyen, J., Kohli, I., Hamzavi, I., Lim, H. W., y Jagdeo, J. (2021). Visible light. Part I: Properties and cutaneous effects of visible light. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 84(5), 1219-1231. [http:// doi:10.1016/j.jaad.2021.02.048](http://doi:10.1016/j.jaad.2021.02.048).
- Belhadj Slimen, I., Najjar, T., y Abderrabba, M. (2017). Chemical and antioxidant properties of betalains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(4), 675-689. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04208>
- Bravo-Hollis, H, Sánchez-Mejorada, H. (1991). *Las cactáceas de México*, Vol. 2. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Castro-Enríquez, D. D., y Montañón-Leyva, B., Del Toro-Sánchez, C. L., Juárez-Onofre, J. E., Carvajal-Millán, E., López-Ahumada, G. A., ... y Rodríguez-Félix, F. (2020). Effect of ultrafiltration of Pitaya extract (*Stenocereus thurberi*) on Its phytochemical content, antioxidant capacity, and UPLC-DAD-MS profile. *Molecules*, 25(2), 281. <https://doi.org/10.3390/molecules25020281>
- Cejudo-Bastante, M. J., Hurtado, N., Muñoz-Burguillos, P., y Heredia, F. J. (2019). *Stenocereus griseus* (Haw) pitaya as source of natural colourant: technological stability of colour and individual betalains. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(11), 3024-3031. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14215>
- Celli, G. B., y Brooks, M. S. L. (2017). Impact of extraction and processing conditions on betalains and comparison of properties with anthocyanins-A current review. *Food Research International*, 100, 501-509. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.034>
- Cervantes-Arista, Clara, Román-Guerrero, A., Oidor-Chan, V. H., Díaz de León-Sánchez, F., Álvarez-Ramírez, E. L., Pelayo-Zaldívar, C., ... y Mendoza-Espinoza, J. A. (2020). Chemical characterization, antioxidant capacity, and anti-hyperglycemic effect of *Stenocereus stellatus* fruits from the arid Mixteca Baja region of Mexico. *Food Chemistry*, 328, 127076. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127076>
- Choo, W. S. (2018) Betalains: Application in functional foods. In: J. M. K. Merillon, G. Ramawat (Eds.). *Bioactive molecules in food*. (pp. 1-28). Switzerland. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54528-8_38-2
- Coy-Barrera, E (2020). Analysis of betalains (betacyanins and betaxanthins). In: A. Sanches Silva, S. F. Nabavi, M. Saeedi, y S. M. Nabavi (Eds.), *Recent Advances in Natural Products Analysis*, (pp. 593-619). Amsterdam, Netherlands, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00017-2>.
- de Wit, M., du Toit, A., Osthoff, G., y Hugo, A. (2019). Cactus pear antioxidants: A comparison between fruit pulp, fruit peel, fruit seeds and cladodes of eight different cactus pear cultivars (*Opuntia ficus-indica* and *Opuntia robusta*). *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(3), 2347-2356. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00154-z>
- Dhananjayan, I., Kathirolu, S., Subramani, S., y Veerasamy, V. (2017). Ameliorating effect of betanin, a natural chromoalkaloid by modulating hepatic carbohydrate metabolic enzyme activities and glycogen content in streptozotocin-nicotinamide induced experimental rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 88, 1069-1079. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.01.146>
- European Food Safety Authority. 2015. Scientific opinion on the reevaluation of beetroot red (E 162) as a food additive. *EFSA Journal* 13(12), 4318. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4318>

- Flores Y.N. Reyna TJ, Cervantes M.C. Luna C.C. (2011). Distribución geográfica y potencial de *Stenocereus pruinosus* y *Stenocereus stellatus* (Cactaceae) en la Mixteca Poblana, México. *Cac. Suc. Mex.*, 56(1): 4-20.
- Gandía-Herrero, F., y García-Carmona, F. (2013). Biosynthesis of betalains: yellow and violet plant pigments. *Trends in Plant Science*, 18(6), 334-343. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.01.003>
- García-Cruz, L., Dueñas, M., Santos-Buelgas, C., Valle-Guadarrama, S., y Salinas-Moreno, Y. (2017). Betalains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitaya (*Stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. Pruinosus* and *S. stellatus*). *Food Chemistry*, 234, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.174>
- García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., y Valle-Guadarrama, S. (2012). Betalains, phenolic compounds and antioxidant activity in pitaya de mayo (*Stenocereus griseus* H.). *Revista Fitotecnica Mexicana*, 35(5), 01-05. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v35nspe5/v35nspe5a3.pdf>
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., y del Carmen Luna-Morales, C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., y Joaquín-Cruz, E. (2013). Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits. *Plant Foods for Human Nutrition*, 68(4), 403-410. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>
- Guzmán, U., Arias, S. y Dávila, P. (2007). *Catálogo de autoridades taxonómicas de las cactáceas (Cactaceae: Magnoliopsida) de México*. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Base de datos SNIB-CONABIO, proyectos Q045 y AS021. México. <https://www.snib.mx/taxonomia/descarga/>
- Guzmán-Maldonado, S. H., Herrera-Hernández, G., Hernández-López, D., Reynoso-Camacho, R., Guzmán-Tovar, A., ... Brat, P. (2010). Physicochemical, nutritional and functional characteristics of two underutilised fruit cactus species (*Myrtillocactus*) produced in central Mexico. *Food Chemistry* 121(2), 381-386. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.039>
- Hadipour, E., Taleghani, A., Tayarani-Najaran, N., y Tayarani-Najaran, Z. (2020). Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy Research*, 34(8), 1847-1867. <https://doi.org/10.1002/ptr.6653>
- Henarejos-Escudero, P., Contreras-Llano, L. E., Lozada-Ramírez, J. D., Gómez-Pando, L. R., García-Carmona, F., y Gandía-Herrero, F. (2021). A dopamine-based biosynthetic pathway produces decarboxylated betalains in *Chenopodium quinoa*. *Plant Physiology*, 186(3), 1473-1486. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab158>

- Hendry, G. A. F., y Houghton, J. D. (Eds.). (1996). *Natural food colorants*. Springer Science & Business Media.
- Herbach, K., Stintzing, F. C., y Carle, R. (2006) Betalain stability and degradation-structural and chromatic aspects. *Journal of Food Science*, 71, R41-R50. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00022.x>
- Herrmann, K. M. (1995). The shikimate pathway: early steps in the biosynthesis of aromatic compounds. *The Plant Cell*, 7(7), 907. doi: 10.1105/tpc.7.7.907
- Hussain, E. A., Sadiq, Z., y Zia-Ul-Haq, M. (2018). *Betalains: biomolecular aspects*. London: Springer International Publishing.
- Kapadia, G. J., Azuine, M. A., Sridhar, R., Okuda, Y., Tsuruta, A., Ichiishi, E., ... y Tokuda, H. (2003). Chemoprevention of DMBA-induced UV-B promoted, NOR-1-induced TPA promoted skin carcinogenesis, and DEN-induced phenobarbital promoted liver tumors in mice by extract of beetroot. *Pharmacological Research*, 47(2), 141-148. [http://doi.org/10.1016/s1043-6618\(02\)00285-2](http://doi.org/10.1016/s1043-6618(02)00285-2)
- Kaur, G., Thawkar, B., Dubey, S., y Jadhav, P. (2018). Pharmacological potentials of betalains. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, 15(3), 20170063.
- Khan, M. I., y Giridhar, P. (2015). Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*, 117, 267-295. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.06.008>
- Koss-Mikołajczyk, I., Kuszniereicz, B., Wiczowski, W., Sawicki, T., y Bartoszek, A. (2019). The comparison of betalain composition and chosen biological activities for differently pigmented prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) and beetroot (*Beta vulgaris*) varieties. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 70(4), 442-452. <https://doi.org/10.1080/09637486.2018.1529148>
- Kushwaha, R., Kumar, V., Vyas, G., y Kaur, J. (2018). Optimization of different variable for eco-friendly extraction of betalains and phytochemicals from beetroot pomace. *Waste and Biomass Valorization*, 9(9), 1485-1494. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9953-6>
- Lugo-Radillo, A., Delgado-Enciso, I., y Peña-Beltrán, E. (2012). Betanidin significantly reduces blood glucose levels in BALB/c mice fed with an atherogenic diet. *Natural Products and Bioprospecting*, 2(4), 154-155. <https://doi.org/10.1007/s13659-012-0034-z>
- Madadi, E., Mazloun-Ravasan, S., Yu, J. S., Ha, J. W., Hamishehkar, H., y Kim, K. H. (2020). Therapeutic application of betalains: A review. *Plants*, 9(9), 1219. <https://doi.org/10.3390/plants9091219>
- Maran, J. P., y Priya, B. (2016). Multivariate statistical analysis and optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from waste red beet stalks. *Journal of Food Science and Technology*, 53(1), 792-799. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1988-8>
- Mondragon-Jacobo, C., Yahia, E. M., y Castellanos, E. (2009). Identification and quantification of pigments in prickly pear fruit. In *VI International Postharvest Symposium* 877 (pp. 1129-1136). <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.154>

- MoBhammer, M. R., Stintzing, F. C., y Carle, R. (2006). Cactus pear fruits (*Opuntia* spp.): A review of processing technologies and current uses. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 8, 1-25. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v8i.274>
- OMS-Organización Mundial de la Salud. (2017). *Enfermedades cardiovasculares*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- Pérez-Loredo, M. G., García-Ochoa, F., y Barragán-Huerta, B. E. (2016). Comparative analysis of betalain content in *Stenocereus stellatus* fruits and other cactus fruits using principal component analysis. *International Journal of Food Properties*, 19(2), 326-338. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1022259>
- Polturak, G., y Aharoni, A. (2018). “La Vie en Rose”: Biosynthesis, sources, and applications of betalain pigments. *Molecular Plant*, 11(1), 7-22. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.10.008>
- Ramírez-Rodriguez, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüenia, N., y Trujillo, J. (2020) Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae Fruits: Recent findings and research opportunities. *Food Chemistry*, 312, 126073. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073>
- Rebollar, J. L. G., y Sancho, A. C. (Eds.). (2010). *C4 y CAM. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas*. Editorial CSIC-CSIC Press.
- Sadowska-Bartosch, I., y Bartosz, G. (2021). Biological properties and applications of betalains. *Molecules*, 26(9), 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
- Sanchez-Gonzalez, N., Jaime-Fonseca, M. R., San Martín-Martínez, E., y Zepeda, L. G. (2013). Extraction, stability, and separation of betalains from *Opuntia joconostle* cv. using response surface methodology. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(49), 11995-12004. <https://doi.org/10.1021/jf401705h>
- Schenck, C. A., y Maeda, H. A. (2018). Tyrosine biosynthesis, metabolism, and catabolism in plants. *Phytochemistry*, 149, 82-102. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.02.003>
- Shetty, A. A., Rana, M. K., y Preetham, S. P. (2012). Cactus: A medicinal food. *Journal of Food Science and Technology*, 49(5), 530-536. DOI 10.1007/s13197-011-0462-5
- Shetty, N. P., Jørgensen, K., y Jørgensen, H. J. L. (2013). Red beet as a model system for studying vacuolar transport of primary and secondary metabolites. In: B. Neelwarne (Ed.), *Red beet biotechnology: food and pharmaceutical applications*. (pp. 75-89). Springer Science+Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3458-0_4
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Cierre agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> 19/09/2023.
- Silva, D. V. T. D., Baião, D. D. S., Ferreira, V. F., Paschoalin, V. M. F. (2020). Betanin as a multipath oxidative stress and inflammation modulator: a beetroot pigment with

- protective effects on cardiovascular disease pathogenesis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1822277>
- Smeriglio, A., Bonasera, S., Germanò, M. P., D'Angelo, V., Barreca, D., Denaro, M., ... y Trombetta, D. (2019). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. Fruit as source of betalains with antioxidant, cytoprotective, and anti-angiogenic properties. *Phytotherapy Research*, 33(5), 1526-1537. <https://doi.org/10.1002/ptr.6345>
- Steglich, W., y Strack, D. (1990). Betalains. In: A. Brossi (Eds.), *The alkaloids: Chemistry and pharmacology* (pp. 1-62). London. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0099-9598\(08\)60163-7](https://doi.org/10.1016/S0099-9598(08)60163-7)
- Stintzing, F. C., y Carle, R. (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food science & Technology*, 15(1), 19-38. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.004>
- Stintzing, F. C., y Carle, R. (2007). Betalains-emerging prospects for food scientists. *Trends in Food Science & Technology*, 18(10), 514-525. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2007.04.012>
- Stintzing, F. C., Schieber, A., y Carle, R. (2002). Identification of betalains from yellow beet (*Beta vulgaris* L.) and cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] by high-performance liquid chromatography-electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(8), 2302-2307. <https://doi.org/10.1021/jf011305f>
- Tiwari, B. K., y Cullen, P. J. (2013). Extraction of red beet pigments. In: B. Neelwarne, (Eds.), *Red beet biotechnology* (pp. 373-391). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3458-0_14
- Verona-Ruiz, A., Urcia-Cerna, J., y Paucar-Menacho, L. M. (2020). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): Cultivo, características fisicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 439-453. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.16>
- Wybraniec, S., y Mizrahi, Y. (2002). Fruit flesh betacyanin pigments in *Hylocereus* cacti. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(21), 6086-6089. <https://doi.org/10.1021/jf020145k>
- Yang, J. W., y Choi, I. S. (2017). Comparison of the phenolic composition and antioxidant activity of Korean black raspberry, Bokbunja (*Rubus coreanus* Miquel) with those of six other berries. *CyTA-Journal of Food*, 15(1), 110-117.
- Zamanian, A., y Hardiman, C. J. H. F. E. (2005). Electromagnetic radiation and human health: A review of sources and effects. *High Frequency Electronics*, 4(3), 16-26.

Capítulo 8

Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench): un alimento nutritivo alternativo ante los cambios climáticos en tiempos actuales
Sorghum (Sorghum bicolor L. Moench), an alternative food to the climatic changes in current times

*Damara A. Guillén Ibarra
Octelina Castillo Ruiz*
Sanjuana E. Alemán Castillo¹*

Resumen

La agricultura es una actividad primordial para la supervivencia del ser humano y de la actividad económica mundial. En tiempos recientes, esta actividad se ha visto afectada debido a que depende en gran medida del comportamiento del clima y resulta vulnerable ante cualquier cambio ambiental. Los cambios climáticos impactan en la producción de alimentos y, en consecuencia, afecta a la economía y la estabilidad social por la falta de alimentos. A nivel mundial, la demanda de comida ha crecido en un 20 % en las últimas décadas y en un futuro se prevé una crisis alimentaria, por lo que es necesario contar con productos alternativos para enfrentar esta situación crítica. En México, las sequías, altas temperaturas y altos costos de producción de cultivos como el maíz y trigo han hecho que los productores busquen nuevas alternativas de siembra. El sorgo está tomando auge en áreas que presentan condiciones climáticas donde solamente este cultivo puede desarrollarse. La producción de este cereal ocupa el tercer lugar en México, después del frijol y el maíz. Tamaulipas es uno de los principales estados productores de sorgo, en promedio cultiva 895 mil hectáreas, con una producción de 2 millones 383 mil toneladas al año. Este producto ha sido destinado a la alimentación del ganado, sin embargo, es una buena alternativa para la alimentación humana, ya que se puede utilizar para preparar harina de sorgo para la fabricación de galletas, pan y muchos otros productos alimentarios que se pueden incluir en una dieta sostenible. Estos

¹ Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-Aztlán.
Calle 16 y lago de Chapala S/N colonia Aztlán, C.P. 88740, Reynosa, Tamaulipas-México.

*Autor de correspondencia: ocastillo@docentes.uat.edu.mx

alimentos también son ideales para las personas que padecen de la enfermedad celiaca, que los hace intolerantes a la gliadina y glutenina, dos proteínas que se encuentran ausentes en los productos elaborados a partir de sorgo.

Palabras clave: sorgo, sequía, alimento, alimentación, humano.

Summary

Agriculture is one of the main activities of human beings, not only because their survival depends on it, but also because it is a fundamental economic activity in the world. In recent times, this activity has been affected to a large extent by the behavior of the climate and is vulnerable to any environmental change. The impact of climate change on food production is of great importance and consequently affects the economy and social stability of the population. Globally, the demand for food has grown by 20% in recent decades and a food crisis is expected in the future, so it is necessary to seek for alternative products to face this critical situation. In Mexico, droughts, high temperatures, and high production costs of crops such as corn and wheat have caused producers to look for new planting alternatives, and sorghum is gaining momentum in areas with climatic conditions where only this crop can grow. Sorghum production ranks third in Mexico after beans and corn. Tamaulipas is one of the main sorghum producing states, cultivating an average of 895 thousand hectares with a production of 2 million 383 thousand tons per year. This product has been destined for livestock feed; however, it is a good alternative for human food since it can be used to prepare sorghum flour to manufacture cookies, bread, and many other food products that can be included in a sustainable diet. These foods are also ideal for people suffering from celiac disease, which makes them intolerant to gliadin and glutenin, two proteins that are absent in products made from sorghum.

Keywords: sorghum, drought, food, alimentation, human.

Cambios climáticos

La *Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas* (UNFCC, 2015) menciona que el cambio del clima es consecuencia de las actividades humanas, que han alterado la composición de las sustancias de la atmósfera, como el dióxido de carbono, que resulta de la sumatoria de todas las emisiones de los países del mundo, en particular, los países en vías de desarrollo. Los investigadores en esta área refieren que una de las actividades que provoca mayor contaminación atmosférica es la producción de alimentos, cuya demanda se ha incrementado con tal de satisfacer las necesidades de la población. Esta actividad contradice el reto de mantener e intensificar la producción agrícola, que va relacionada con el detrimento de los suelos y disminuyen la probabilidad de mejorar la producción

debido a los factores involucrados, como la salinidad de los suelos, la escorrentía química y biológica, erosión de los suelos, sequías, heladas y comportamiento de los ciclos de lluvia diferentes a otros tiempos. Como consecuencia se reducen las superficies cosechadas, lo que repercute en el mercado local, regional, nacional e internacional (Arteaga y Burbano, 2018; López-Feldman et al., 2018).

Sequía en México

La sequía se define como “un fenómeno natural que se manifiesta por la deficiencia de humedad anormal y persistentes”, con consecuencias en la producción de alimentos, supervivencia de animales y de la humanidad (Velasco y Grothendieck, 2021). Esta problemática afecta a todo el planeta, y México es uno de los países con mayor afectación, reflejado en la zona norte, con repercusión en la disminución de la producción agrícola. La sequía ocurrida en 2011 y 2012 con afectaciones en el sector socioeconómico, que involucró al 80 % de la República mexicana con un costo mayor a dieciséis mil millones de pesos (Ortega-Gaudín, 2018). La segunda sequía más grave se reportó en 2020-2021 y afectó al 75.27 % del territorio nacional, siendo los estados de Sonora (47 %), Chihuahua (16.6 %), Guerrero (11.5 %), Sinaloa (65 y 35 %) y Tamaulipas (7.1 %) los más afectados (Martínez, 2021). La sequía puede exponer a todo el mundo a padecer consecuencias físicas, químicas y biológicas (Ortega-Gaudín, 2018). En el territorio mexicano, de forma recurrente se presenta esta condición, principalmente en el centro y norte del país. Al menos un cuarto del territorio siempre experimenta algún grado de sequía (Martínez, 2021). La precipitación pluvial en México, de acuerdo con datos reportados por el Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, y el Centro Mexicano de Derecho Ambiental, asciende a un volumen aproximado de 1511 km³ por año. Debido a ello, México se cataloga como un país con baja disponibilidad de agua (Martínez, 2017).

La escasez de agua disminuye el rendimiento de los cultivos entre un 20 y 50 %, provocando un crecimiento desacelerado de la economía por falta de producción de alimentos. Se estima que para el 2050, las tasas de crecimiento económico podrían disminuirse en un 6 % del Producto Interno Bruto (Contreras-Medina y Melo-Sabogal, 2022). Por ello, es necesario disponer de especies vegetales que puedan utilizarse bajo condiciones de escasez de agua, nutrientes y elevadas temperaturas durante el ciclo de cultivo. El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es un cultivo que produce grano y forraje bajo estas condiciones climáticas. Se introdujo a México para aprovechar su tolerancia a la sequía en áreas de temporal (Pereira-Crespo et al., 2022). La huella hídrica del sorgo es mucho menor comparativamente con el trigo y maíz y otros cereales alimentarios.

Sorgo

Origen

De acuerdo con la FAO (1995), el sorgo se introdujo de Etiopía (África Oriental) en el año 200 d.C., principalmente para elaborar cerveza. En el siglo I, su expansión partió desde Camerún a la frontera meridional de la selva congoleña. En el siglo XIX, llegó a América Latina con el nombre de «maíz de Guinea» y lo introdujeron las personas encargadas de transportar esclavos desde el África Occidental, sin embargo, su importancia como alimento se adquirió en el presente siglo.

Características físicas y agronómicas

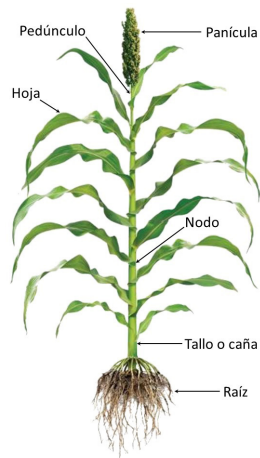
La FAO (1995) reporta que el sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) pertenece a la tribu Andropogonae de la familia herbácea Poaceae. Se caracteriza por espiguillas que nacen en pares, es hierba perenne de medio ambiente tropical y da oportunidad de que su producción se realice varias veces al año. Tiene fisiología similar al maíz con una estructura con capacidad de almacenar reservas suficientes para resistir en climas secos. Presentan una altura entre 1 y 3 metros con tallo grueso en la que nacen espigas de manera pareada. Tiene inflorescencias en panojas y cada panícula contiene de 400 a 8000 granos. Los granos presentan coloración entre blanco traslúcido y un pardo rojizo, gradaciones de color rosa, rojo, amarillo, pardo y mezcla entre ellos, con semillas oblongas (3 mm de tamaño). Es una planta que puede crecer desde 0 hasta los 1500 metros sobre el nivel del mar (msnm), pero la altura óptima para su cultivo se encuentra entre 0 y 800 msnm mientras que su temperatura óptima de germinación es de 26.5 a 37.7 °C (Pérez et al., 2010; Herrera et al., 2014). En la Figura 1 se muestra la estructura de la planta de sorgo.

El sorgo presenta las siguientes características de resistencia a la sequía (Pérez et al., 2010):

- Un sistema radical muy ramificado, déficit de presión de difusión en sus raíces.
- Las hojas y tallos presentan una cubierta de cera que evita la evaporación.
- Las hojas muestran una nervadura en la parte media, de tal manera que cuando existe sequía se enrollan para protegerse, mantener la humedad y la estructura de las células higroscópicas.
- Un número de estomas mayor que el maíz, lo que le permite reaccionar con mayor rapidez y eficacia a los cambios de temperatura y humedad del medio ambiente.
- Facultad de entrar en reposo vegetativo cuando falta el agua.

Figura 1

Estructura del sorgo

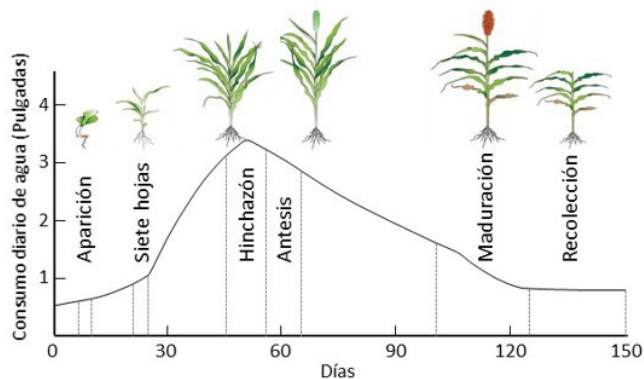


Fuente: adaptado de Pinheiro (2021) y de Du Plessis (2008).

En la Figura 2 se muestra el crecimiento y el consumo diario de agua, con mayor consumo entre los 50 y 60 días después de plantarse.

Figura 2

Utilización diaria del agua por la planta del sorgo



Fuente: adaptado de Pérez et al. (2010).

Este cultivo es muy importante en todo el mundo y tiene diversos atributos notables. Es muy eficiente en ambientes tropicales, en ambientes cálidos con escasez de agua y con intensidad luminosa alta, como los prevalecientes en regiones semiáridas (Wong et al., 2010; Chuck-Hernández et al., 2011). Taylor et al. (2006) mencionan que este cereal es uno de los más resistentes a la sequía y podría ser la planta del futuro debido a la escasez de agua para irrigación y al elevado nivel de CO₂ en el ambiente. Su huella hídrica es menor que la de otros cereales y puede crecer en tierras marginales en condiciones que no soportan otros cereales como el maíz (*Zea mays* L.) de cualquier variedad. La importancia del sorgo ha sido tal que podría sustituir al trigo y al maíz para la elaboración de productos alimentarios (Pérez et al., 2010; Wong et al., 2010; Chuck-Hernández et al., 2011; Montes-García et al., 2012).

Clasificación

Existe un gran número de variedades, las cuales pueden ser clasificadas en tres grupos: sorgo grano, forrajero y dulce. El sorgo grano es la variedad no sacarina del sorgo, de la cual se explota el grano. Gran parte de este se utiliza como materia prima en la elaboración de productos alimenticios balanceados para animales. En la alimentación humana se emplea en forma de harina como materia prima para la elaboración de productos de panificación, mientras que la industria lo utiliza para la extracción de almidón, glucosa, alcohol, acetona y butanol (FND, 2011).

El sorgo forrajero ha sido propuesto como un cultivo energético anual por su amplia diversidad genética, lo que permite desarrollar variedades que se adapten a varios climas. Presenta características deseables, como un alto rendimiento, uso eficiente del agua, tolerancia a la sequía, sistemas de producción estables y potencial para el mejoramiento utilizando enfoques tradicionales y genómicos. Su principal uso es como alimento para ganado, aunque Hallam et al. (2001) reportaron el uso de este sorgo para la producción de bioetanol, encontrando que produce más biomasa que otras alternativas, incluyendo alpiste (*Phalaris canariensis*), pasto varilla (*Panicum virgatum*), tallo azul (*Andropogon gerardii*), alfalfa (*Medicago sativa*) y maíz (*Zea mays*) (Griffith, 2014).

El sorgo dulce es utilizado para la producción de azúcar, jarabes y etanol (Chuck-Hernández et al., 2011) y ha surgido como uno de los principales cultivos bioenergéticos debido a que contiene altas cantidades de azúcar soluble fermentable en el tallo y lignocelulosa degradable en el bagazo. Ha sido considerado como una especie con azúcar soluble y bagazo residual para su aplicación en biocombustibles; sin embargo, su efecto sobre el azúcar soluble en la producción de bagazo y sacarificación de biomasa ha sido poco estudiado (Li et al., 2014).

Características nutricionales

Se ha observado el valor nutricional del sorgo como una aportación benéfica para la alimentación animal y humana (Pérez et al., 2010). El sorgo contiene algunos compuestos antioxidantes, que promueven la salud y es libre de gluten, es una buena fuente de carbohidratos seguido de proteínas, lípidos, fibra, fibra dietética y cenizas (Palavecino et al., 2020; Espitia-Hernández et al., 2022). El promedio del valor nutricional del grano entero de sorgo es de 356 kcal/100 g (Dicko et al., 2006). El segundo componente del grano de sorgo son las proteínas (8-18%), principalmente albúminas, globulinas y prolaminas (Espitia-Hernández et al., 2022). Los aminoácidos de las proteínas determinan su calidad y en el sorgo se encuentran aminoácidos esenciales con calidad suficiente para integrarse en la alimentación animal y humana. En la Tabla 1 se muestra la composición de aminoácidos esenciales del grano de sorgo y el maíz (FAO, 1995; Dicko et al., 2006).

Tabla 1

Composición de aminoácidos esenciales del grano de sorgo (miligramos por gramo de sorgo)

Nutrientes	Sorgo	Maíz
Aminoácido	Contenido (mg/g)	Contenido (mg/g)
Isoleucina	245	250
Leucina	832	440
Lisina	126	340
Metionina	87	-
Cistina	94	-
Fenilalanina	306	380
Tirosina	167	380
Treonina	189	250
Triptófano	63	60
Valina	313	310

Fuente: FAO (1995).

El 69.5% del grano de sorgo es almidón, el cual es la principal forma de almacenamiento de carbohidratos en este cereal (FAO, 1995). Sin embargo, el sorgo también contiene polisacáridos no amiláceos, principalmente localizados en el pericarpio y endospermo, con una proporción de 2 a 7% dependiendo de la variedad (Dicko et al., 2006). El 3-3.5% corresponde a grasa cruda en el grano de

sorgo, valores superiores a los granos de trigo y arroz, pero menor a los granos de maíz (FAO, 1995; Dicko et al., 2006; Pradeep et al., 2014). La grasa de este grano es rica en ácidos grasos poliinsaturados -principalmente en el germen (80 %). En la Tabla 2 se muestran los principales ácidos grasos presentes en el sorgo.

Tabla 2

Ácidos grasos contenidos en el grano de sorgo

Ácido graso	Contenido (%)
Ácido linoleico	49
Ácido oleico	31
Ácido palmítico	14
Ácido linolénico	2.7
Ácido esteárico	2.1

Fuente: Dicko et al. (2006).

Los minerales se ubican en el germen y pericarpio del grano de sorgo. Se ha reportado que es una buena fuente de minerales, con 20 de ellos, entre los que se encuentran el fósforo, potasio, hierro y zinc. La composición mineral de los distintos tipos de granos de sorgo es muy variable debido a las condiciones ambientales que predominan en la región de cultivo. En cuanto a vitaminas, el sorgo es una fuente notable de vitaminas del complejo B y liposolubles A, D, E y K (FAO, 1995; Dicko et al., 2006). En la Tabla 3 se observa la composición de vitaminas y minerales del sorgo, los cuales son benéficos para la salud humana.

Tabla 3

Composición de vitaminas y minerales del sorgo

Mineral	Contenido (mg/100 g) sorgo	Vitaminas	Contenido (mg/g sorgo)
P	352	Niacina	9.16
Mg	171	Lisina	2.9 - 4.9
Ca	15	Vitamina B6	0.5
Fe	4.2	Folacina	0.02

Mineral	Contenido (mg/100 g) sorgo	Vitaminas	Contenido (mg/g sorgo)
Zn	2.5	Ácido Pantoténico	1.25
Cu	0.44	Biotina	0.042
Mn	1.15		
Mo	0.06		
Cr	0.017		

Fuente: FAO (1995).

El sorgo se compone básicamente de almidón, que se digiere más lentamente que el de otros cereales, además de que contiene proteínas de baja digestibilidad, lípidos insaturados, minerales y vitaminas. La mayoría de las variedades de sorgo son ricas en compuestos fenólicos, especialmente 3-desoxiantocianidinas y taninos. Los resultados obtenidos *in vitro* y en animales han demostrado que los compuestos fenólicos y liposolubles (policosanoles) aislados del sorgo benefician el microbiota intestinal y la fibra puede disminuir la obesidad, el estrés oxidativo, la inflamación, la diabetes, la dislipidemia, el cáncer y la hipertensión (de Morais et al., 2017).

El grano de sorgo pigmentado es una rica fuente de antioxidantes como los polifenoles, principalmente los taninos, que tienen múltiples beneficios en la salud humana, como propiedades antiproliferativas asociadas con la prevención de ciertos tipos de cáncer, actividades antioxidantes relacionadas con la prevención de enfermedades asociadas al estrés oxidativo, actividad antimicrobiana y efectos antiinflamatorios. Sin embargo, no es posible asimilar este tipo de compuestos por completo debido a factores antinutricionales, como los taninos que forman complejos con las proteínas y el hierro, reduciendo su digestibilidad. Tomando en cuenta estas restricciones, el sorgo es una fuente importante de sustancias bioactivas con potencial valor biológico (Espitia-Hernández et al., 2022).

Los antecedentes limitados del uso de sorgo en los alimentos occidentales y las propiedades funcionales del grano de sorgo en dietas saludables sugieren enfocarse en el desarrollo de nuevas variedades de sorgos. El sorgo presenta potencial como ingrediente principal en nuevos alimentos, ya que se encuentra libre de gluten. Además, la funcionalidad del almidón que es de digestión lenta y con beneficios para la salud por la presencia de compuestos fenólicos (Khoddami et al., 2021).

La mayor concentración de fitoquímicos se encuentra en el salvado y germen el grano de sorgo, entre estos se encuentran compuestos fenólicos bioactivos (en granos de color marrón y negro) y se ha demostrado que poseen una alta

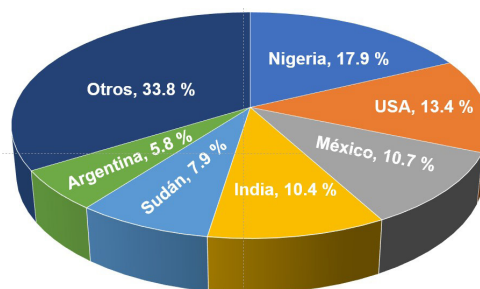
actividad antioxidante que depende de la concentración de fenoles y está altamente correlacionada con los contenidos de 3-desoxiantocianidinas, flavononas y taninos (Espitia-Hernández et al., 2022; Xiong et al., 2022).

Producción

Es un cereal que se cultiva en todo el mundo, es el quinto cultivo de cereales más producido, después del maíz (*Zea mays* L.), el trigo (*Triticum aestivum* L.), el arroz (*Oryza sativa* L.) y la cebada (*Hordeum vulgare* L.). Los principales países productores de sorgo en el África subsahariana son Nigeria, Etiopía, Sudán, Níger y Burkina Faso, con una producción de 6.4, 5.1, 2.1, 1.8 y 1.8 millones de toneladas/año, respectivamente (Wanga, Shimelis, y Mengistu, 2022). En México, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2020) reportó hasta marzo de 2020, 1 millón 3 mil toneladas. Siendo los estados Tamaulipas, Guanajuato y Sinaloa los que presentaron una mayor producción (Figura 3).

Figura 3

Principales productores de sorgo en el mundo en el ciclo 2010-2011



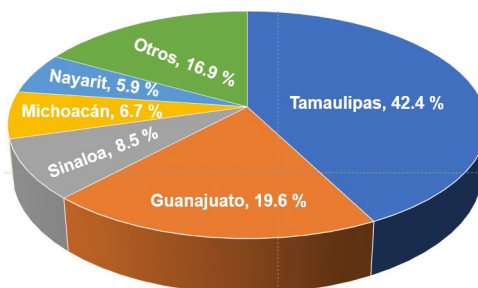
Fuente: FR (2011).

De acuerdo con el USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), en la producción de sorgo en México predomina Tamaulipas, Guanajuato, Sinaloa y Michoacán (Figura 4). Siendo Tamaulipas el principal productor del país debido a la extensa superficie que cultiva, 941 mil hectáreas con una producción promedio de 2.4 millones de toneladas anuales (Montes et al., 2010a; FR, 2011). El 99% de la producción se utiliza en la industria alimentaria animal, para elaborar alimentos balanceados. Existe un gran interés en la utilización del sorgo, por lo que se somete a un proceso de molienda para obtener harina, que se puede utilizar sola o en combinación con otras harinas para la fabricación de galletas y pan o para sustituir

a la harina de trigo en la preparación de galletas, panes y otros alimentos (Chuck-Hernández et al., 2011; FR, 2011; FND, 2014).

Figura 4

Principales estados productores de sorgo en México en 2009



Fuente: FR (2011).

Consumo humano

El uso del sorgo para la alimentación humana, tanto en la zona rural como urbana, no ha crecido en los últimos 35 años comparativamente con el resto de los cereales. En los países con baja economía, el consumo de este grano es elevado, caso contrario con aquellos países que presentan mayor poder adquisitivo (FAO, 1995; Singh et al., 2011). En Norteamérica, Sudamérica, Europa y Australia su uso es destinado para consumo animal, sin embargo, en Asia, África, China y América Central, el grano es usado para consumo humano (Anglani, 1998). Es el principal alimento básico para las personas más pobres del mundo y las áreas marginales semitrópicas, como sustitutos del maíz y trigo (Pérez et al., 2010). Se consume como grano entero o como harina, con la que se prepara una amplia gama de productos tradicionales, de acuerdo con las diferentes áreas geográficas, como pueden ser gachas, consistentes o delgadas, pan plano con masa fermentada o sin fermentar, galletas, pasta alimenticia, *roti* o *chapatti* y otros productos fritos similares a los que se preparan con sémola de maíz y arroz (López et al., 2011; Singh et al., 2011). Otro uso del sorgo para alimentación humana es el sorgo germinado en harina, ya que mejora la digestibilidad, por lo que es recomendado para consumo en niños. Los métodos de procesamiento aplicados para la preparación del sorgo incluyen calor húmedo o seco, germinación y fermentación (Elkhalifa et al., 2005; Correia et al., 2010) o como jarabe glucosado de sorgo, que es similar a la dextrosa (Miliam et al., 2019).

Conclusiones

Las altas temperaturas, la reducción de precipitaciones y sequías, han ocasionado que los productores busquen nuevas alternativas para siembra y alimentación, como el sorgo, por su resistencia a la sequía pues poseer una capa de cera que recubre las hojas y tallos y células higroscópicas que disminuyen la evaporación y sobrevive con una huella hídrica menor a otros cereales y es utilizado para la elaboración de tortillas y alimentos de panificación con un sabor aceptable para la población.

Referencias

- Anglani, C. (1998). Sorghum carbohydrates-A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(1), 77-83. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1007944219239.pdf>
- Arteaga, L. E., y Burbano, J. E. (2018). Efectos del cambio climático: Una mirada al Campo. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 79-91. <https://doi.org/10.22267/rca.183502.93>
- Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Heredia-Olea, E., y Serna-Saldívar, S. (2011). Sorgo como cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnología, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3), 529-549. http://www.rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol.%2010%20No.%203/Alim_6/Alim_6.pdf
- Contreras-Medina, L. M., y Melo-Sabogal, D. V. (2022). ¿Cómo afecta la escasez de agua a la producción de tus alimentos y qué estrategias agrícolas se han implementado para reducir su impacto? *Digital Ciencia@ UAQRO*, 5(8), 20-28. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/629/760>
- Correia, I., Nunes, A., Barros, A. S., y Delgadillo, I. (2010). Comparison of the effects induced by different processing methods on sorghum proteins. *Journal of Cereal Science*, 51(1), 146-151. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.11.005>
- De Morais, C. L., Pinheiro, S. S., Martino, H. S. D., y Pinheiro-Sant'Ana, H. M. (2017). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.): Nutrients, bioactive compounds, and potential impact on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(2), 372-390. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.887057>
- Dicko, M. H., Gruppen, H., Traoré, A. S., Voragen, A. G., y Van Berkel, W. J. (2006). Sorghum grain as human food in Africa: relevance of content of starch and amylase activities. *African Journal of Biotechnology*, 5(5), 384-395.
- Du Plessis, J. (2008). *Sorghum production*. Republic of South Africa Department of Agriculture. <https://www.arc.agric.za/arc-gci/Fact%20Sheets%20Library/Sorghum%20Production.pdf>
- Elkhalifa, A., Schiffler, B., y Bernhardt, R. (2005). Effect of fermentation on the functional properties of sorghum flour. *Food Chemistry*, 92(1), 1-5.

- Espitia-Hernández, P., Chavez, G. M. L., Ascacio-Valdés, J. A., Dávila-Medina, D., Flores-Naveda, A., Silva, T., ... y Sepúlveda, L. (2022). Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(8), 2269-2280. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852389>
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (1995). *El sorgo y el mijo: en la nutrición humana*. Colección FAO: Alimentación y nutrición N°27. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/t0818s/t0818s01.htm>
- _____. (s.f.). *Cuadro 6. Contenido de aminoácidos esenciales de las proteínas del germen y el endospermo del maíz*. <https://www.fao.org/3/t0395s/T0395S04.htm>
- FND. (Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero). (2014). *Información sector rural. Precios. Lateral. Boletín alimentario*. _
- FR. (Financiera Rural). (2011). *Información sector rural. Documents. Monografías. Monografía sorgo*.
- Griffith, A. P., Haque, M., y Epplin, F. M. (2014). Cost to produce and deliver cellulosic feedstock to a biorefinery: Switchgrass and forage sorghum. *Applied Energy*, 127, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.068>
- Hallam, A., Anderson, I. C., y Buxton, D. R. (2001). Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercrops for biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 21(6), 407-424. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00051-4)
- Khoddami, A., Messina, V., Vadabaliya Venkata, K., Farahnaky, A., Blanchard, C. L., y Roberts, T. H. (2021). Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1960793>
- Li, M., Feng, S., Wu, L., Li, Y., Fan, C., Zhang, R., ... y Peng, L. (2014). Sugar-rich sweet sorghum is distinctively affected by wall polymer features for biomass digestibility and ethanol fermentation in bagasse. *Bioresource Technology*, 167, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.086>
- López, N., Tique, M., y Pérez, L. (2011). Contribución al estudio del sorgo para nutrición humana. *Revista Perspectivas en Nutrición Humana*, 13(1), 33-44. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-41082011000100004
- López-Feldman, A., Torres, J. M., y Kerrigan, G. (2018). *Estimación del impacto del cambio climático sobre los principales cultivos de 14 países del Caribe*. CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44280/S1800988_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Martínez, B. (2021). *Sequía 2020-2021: La segunda más severa del registro reciente*. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. <https://www.atmosfera.unam.mx/sequia-2020-2021-la-segunda-mas-severa-del-registro-reciente/>

- Martínez, P. C. C. (2017). Gestión del riesgo como un instrumento para prever los estragos de las sequías y de las inundaciones en México. *Ambiente y Desarrollo*, 21(40), 27-42. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-40.grip>
- Milian, Y. P., Aguilar, I. G., López, L. R., Quesada, F. S., y Pentón, M. P. (2019). Obtención de jarabes glucosados a partir de harina de sorgo UDG-110 mediante hidrólisis enzimática. *Afinidad*, 76(588). <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/361879/456481>
- Montes-García, N., Williams-Alanís, H., Moreno-Gallegos, T., Cisneros-López, M. y Pecina-Quintero, V. (2012). 'Rb-paloma', variedad de sorgo blanco para producción de grano y forraje. *Rev. Fitotec. Mex.* 35(2), 185-187. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v35n2/v35n2a11.pdf>
- Ortega-Gaucín, D. (2018). Medidas para afrontar la sequía en México: una visión retrospectiva. *Revista de El Colegio de San Luis*, 8(15), 77-105. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcsl/v8n15/1665-899X-rcsl-8-15-77.pdf>
- Palavecino, P. M., Curti, M. I., Bustos, M. C., Penci, M. C., y Ribotta, P. D. (2020). Sorghum pasta and noodles: Technological and nutritional aspects. *Plant Foods for Human Nutrition*, 75(3), 326-336. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11130-020-00829-9>
- Pereira-Crespo, S., Botana, A., Veiga, M., Resch, C., González, L., Lorenzana, R., ... y Flores-Calvete, G. (2022). Predicción del valor nutricional de sorgo para forraje mediante espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIRS) y ecuaciones empíricas. *Tropical Grasslands-Forrajeros Tropicales*, 10(3), 249-260. <https://doi.org/10.1080/09712119.2021.2022488>
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H., Reyes, F., Oquendo, G., y Milián, I. (2010). Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Revista Pastos y Forrajes*, 33(1), 1-26. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v33n1/pyf01110.pdf>
- Pinheiro, A. G., de Souza, L. S. B., da Rosa Ferraz, A. M., Souza, R. M. C. L., y da Silva, T. G. F. (2021). Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira-Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(04), 2403-2426. <https://doi.org/10.26848/rbgef.v14.4.p2403-2426>
- Pradeep, P., Dharmaraj, U., Sathyendra-Rao, B., Senthil, A., Vijayalaskhmi, N., Malleshi, N., y Singh, V. (2014). Formulation and nutritional evaluation of multigrain ready-to-eat snack mix from minor cereals. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3812-3820. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0949-3>
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2020). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/629688/Escenario_sorgo_mar21.pdf

- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (18 de octubre de 2022). *Alta producción de sorgo en Tamaulipas pese a condiciones climáticas*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/destaca-agricultura-alta-produccion-de-sorgo-en-tamaulipas-pese-a-condiciones-climaticas?idiom=es>
- Singh, H., Ho, C. Y., Lin, J. H., Singh, N., y Singh, N. (2011). Influence of heat-moisture treatment and annealing of functional properties of sorghum starch. *Food Research International*, 44, 2949-2954. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.07.005>
- Taylor, J. R. N., Schober, T. J., y Bean, S. R. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science*, 44, 252-271. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009>
- UNFCCC. (2015). *Acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015 - UNFCCC)*. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Velasco, K. E. P., y Grothendieck, F. (2021). *¿Sequía o saqueo? ¿Qué problemas interfieren en la falta de agua en México?* https://www.researchgate.net/profile/Karen-Palacio-Velasco/publication/355770573_Sequia_o_saqueo_Que_problemas_interfieren_en_la_falta_de_agua_en_Mexico/links/617cca310be8ec17a94a7e23/Sequia-o-saqueo-Que-problemas-interfieren-en-la-falta-de-agua-en-Mexico.pdf
- Wanga, M. A., Shimelis, H., y Mengistu, G. (2022). Sorghum production in northern namibia: Farmers' perceived constraints and trait preferences. *Sustainability*, 14(16), 10266. <https://doi.org/10.3390/su141610266>
- Wong, J., Marx, D., Wilson, J., Buchanan, B., Lemaux, P., y Pedersen, J. (2010). Principal component analysis and biochemical characterization of protein and starch reveal primary targets for improving sorghum grain. *Plant Science*, 179, 598-611. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.020>
- Xiong, Y., Zhang, P., Warner, R. D., Hossain, M. N., Leonard, W., y Fang, Z. (2022). Effect of sorghum bran incorporation on the physicochemical and microbial properties of beef sausage during cold storage. *Food Control*, 132, 108544. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108544>

Capítulo 9

Producción de micoplaguicidas a partir de residuos agroindustriales

Production of mycopesticides from agroindustrial waste

Reyna Ivonne Torres Acosta*

Rodolfo Torres de los Santos

José Reyes Hernández¹

Resumen

A nivel mundial, en el sector agrícola cada día se incrementa el uso de agentes de biocontrol microbianos comúnmente conocidos como bioplaguicidas. Las bacterias, actinobacterias, virus y hongos son los más extensamente utilizados para el control de plagas o enfermedades en plantas, en menor escala se utilizan los nematodos y protozoarios. Los micoplaguicidas son un grupo de hongos benéficos con actividad contra insectos, hongos, ácaros, nematodos, entre otras actividades biológicas. Entre los géneros más importantes para el control de plagas insectiles destacan *Beauveria*, *Metarhizium*, *Isaria* y *Paecilomyces*, mientras que para la supresión de enfermedades se emplea comúnmente a *Trichoderma*. Recientemente se ha evidenciado el efecto dual de algunos de estos agentes de biocontrol, es decir, que atacan tanto a insectos como a hongos, y viceversa. La producción artesanal o industrial de estos microorganismos es cada vez más imperante en varios países. Los granos de arroz son los más utilizados como sustrato para la producción artesanal de los micoplaguicidas, debido a su disponibilidad en el mercado, costos factibles, método estandarizado de producción, entre otras cosas. Existen otros sustratos potenciales, como la cascarilla de arroz, olote del maíz, bagazo de caña, granos de avena, trigo, cebada, que en la mayoría de los casos son residuos agroindustriales derivados de la producción de otros insumos primarios. Estos residuos agroindustriales pueden ser aprovechados y utilizarse como materia prima para la producción de micoplaguicidas a gran escala, dándoles un valor agregado, además de contribuir con la reducción de los

¹ Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. E. Cárdenas González No. 1201 poniente, Jardín, 89840. Ciudad Mante, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: ritorres@docentes.uat.edu.mx

impactos medioambientales. El uso de bioproductos como los micoplaguicidas impacta positivamente en el bienestar social, al producir alimentos más saludables y con enormes beneficios en los agroecosistemas y ecosistemas, impulsando así el objetivo del Desarrollo Sostenible de “Acciones por el clima” al reutilizar subproductos agroindustriales, reducir paulatinamente el uso de agroquímicos y por ende, reducir el desecho de envases al ambiente. Sin duda alguna, la sociedad juega un papel importante al exigir alimentos más saludables e inocuos ante el sector agroalimenticio.

Palabras clave: control biológico, entomopatógenos, residuo agroindustrial.

Summary

Worldwide, in the agricultural sector the use of microbial biocontrol agents commonly known as biopesticides is increasing every day. Bacteria, actinobacteria, viruses and fungi are the most widely used for the control of pests or diseases in plants, on a lesser scale nematodes and protozoa are used. Mycopesticides are a group of beneficial fungi with activity against insects, fungi, mites, nematodes, among other biological activities. Among the most important Genera for the control of insect pests are *Beauveria*, *Metarhizium*, *Isaria* and *Paecilomyces*, while for the suppression of diseases *Trichoderma* is commonly used. It is important to note that the dual effect of some of these biocontrol agents has recently been demonstrated, that is, they attack both insects and fungi and viceversa. The artisanal or industrial production of these microorganisms is increasingly prevailing in several countries. Rice grains are the most used as a substrate for the artisanal production of mycopesticides, mainly due to their availability in the market, feasible costs, standardized production method, among other things. There are other potential substrates such as rice husk, corn cob, sugarcane bagasse, oat grains, wheat, barley, which in most cases are agro-industrial residues derived from the production of other primary inputs. These agro-industrial residues can be used and used as raw material for the production of mycopesticides on a large scale, giving them added value, as well as contributing to the reduction of environmental impacts. The use of bioproducts such as mycopesticides has a positive impact on social well-being, by producing healthier food and with enormous benefits in agroecosystems and ecosystems, thus promoting the Sustainable Development Goals-UN of “Climate Actions” by reusing agroindustrial by-products, gradually reducing the use of agrochemicals and therefore, reduce the waste of containers to the environment. Without a doubt, as a society we play an important role by demanding healthier and safer food from the agri-food sector.

Keyword: Biological control, entomopathogenic, agro-industrial residues

Agricultura ecológica

La poblacional mundial se ha incrementado en los últimos años y sigue siendo dinámica. Este incremento poblacional trae consigo una necesidad mayor de insumos alimenticios. Para atender esta demanda de alimentos, se requiere una mayor producción agrícola sustentable y sostenible. Cada día se tienen menos recursos (p. ej. tierras de cultivo fértiles y agua) necesarios para la producción de alimentos. Esto representa un problema social que debe atenderse a la brevedad. Sin embargo, para lograr una mayor producción agrícola, se requiere una cantidad mayor de agroinsumos para proteger la producción de cultivos tanto de plagas como de enfermedades, además de proveerles los nutrientes necesarios (Bautista, 2018). La opción que persiste en el control fitosanitario de plagas se basa en el uso frecuente de agroquímicos (Arredondo et al., 2020), que suelen tener impactos negativos a la salud humana y el ambiente. La Organización Mundial de la Salud (OMS) reportó de 2 a 5 millones de envenenamientos en el mundo, causados por plaguicidas; 200 000 de estos casos terminaron en la muerte del afectado, y de estas muertes, el 99 % ocurre en zonas rurales de países en desarrollo (Bautista, 2018). Una opción promisorio a esta problemática es el reemplazo paulatino de los productos químicos por productos biológicos. Existen microorganismos benéficos con impactos mínimos o nulos en el medio ambiente y se sugieren ampliamente para el control biológico de plagas y enfermedades de cultivos hortofrutícolas y especies forestales. A estos microorganismos benéficos se les conoce como bioplaguicidas, destacando como grupo, las bacterias, hongos, nematodos y protozoarios, además de algunos virus (entomopatógenos y bacteriófagos). La agencia de protección ambiental de Estados Unidos de América clasifica a los bioplaguicidas en tres categorías: a) microbianos, b) bioquímicos y c) plantas que incorporan en su ADN sustancias protectoras (Seiber et al., 2014). Los productos microbianos incluyen al propio microorganismo como ingrediente activo o sus derivados (p. ej. compuestos volátiles y no volátiles con acción bioplaguicida). Algunas estructuras morfológicas, como esporas, conidios, blastosporas, e incluso el micelio de hongos, son extensamente utilizadas en la agricultura orgánica como micoplaguicidas.

Hongos utilizados en la agricultura orgánica

Los hongos entomopatógenos (HE), conocidos también como micoplaguicidas, son una alternativa viable y sostenible para el control de plagas agrícolas. Son seguros para el humano y no afectan al medio ambiente. Además, algunos son específicos, por lo que, la probabilidad de inducir el desarrollo de resistencia en los insectos objetivo es baja o nula (Arthurs y Dara, 2019).

Al proceso de infección causada por HE en un insecto se le conoce como micosis y los pasos se presentan como sigue:

- a. Adhesión del conidio en el integumento del insecto
- b. Germinación del conidio
- c. Penetración del conidio en la cutícula
- d. Proliferación del hongo en el hemocele
- e. Producción de metabolitos secundarios y toxinas por el hongo dentro del insecto
- f. Muerte del insecto
- g. Colonización fúngica dentro del cuerpo del insecto
- h. Emergencia del micelio fuera del insecto
- i. Esporulación masiva del hongo
- j. Diseminación del hongo

Metarhizium anisopliae (Figura 1), *Beauveria bassiana* (Figura 2), *Isaria fumosorosea* (Figura 3), *Paecilomyces lilacinus* (Figura 4) son algunos de los HE más utilizados en el control biológico de plagas (Angel-Cuapio et al., 2016). Estos HE son candidatos promisorios para ser producidos masivamente en sustratos sólidos o líquidos por su capacidad de producir una alta cantidad de estructuras reproductivas o conidios infectivos responsables de producir la micosis en el insecto hospedero. Los granos de arroz son los más utilizados como sustrato sólido, también se han utilizado, aunque en menor escala, los granos y semillas de trigo, cebada, avena, lenteja, maíz, garbanzo, sorgo, cacahuete, chícharo, frijol, soya, entre otros. Solo unos cuantos HE se han desarrollado a nivel comercial, entre estos, algunas cepas de *M. anisopliae* y *B. bassiana*, la razón principal ha sido la falta de métodos de producción redituables, vida de anaquel corta de los HE y falta de tecnologías que favorezcan su persistencia en el ambiente. A pesar de esto, el uso de HE como agentes de biocontrol se ha incrementado en las últimas décadas, detonado por el auge e interés cada vez mayor por agroinsumos más amigables con el medio ambiente. *Trichoderma harzianum* (Figura 5) es otro de los hongos ampliamente utilizados en el control biológico, especialmente para la supresión de fitopatógenos fúngicos, por su amplio espectro de acción antagonista y habilidad micoparasítica.

Figura 1

Apariencia de Metarhizium anisopliae cultivada in vitro en medio PDA solidificado mostrando una esporulación verde



Figura 2

Apariencia de Beauveria bassiana cultivada in vitro en medio PDA solidificado mostrando una esporulación blanca

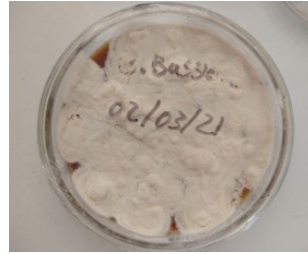


Figura 3

Apariencia de Isaria fumosorosea cultivada in vitro en medio sólido mostrando una esporulación rosa tenue



Figura 4

Apariencia de de Paecilomyces lilacinus cultivada in vitro en medio PDA solidificado mostrando una esporulación rosa

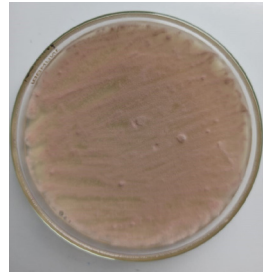


Figura 5

Apariencia de Trichoderma harzianum cultivada in vitro en medio sólido mostrando una esporulación verde



Fuente: fotografías de los autores.

Trichoderma es un género cosmopolita habitante natural del suelo. Algunas de sus especies producen compuestos antifúngicos, esta habilidad las posiciona como excelentes agentes de biocontrol (Michel-Aceves et al., 2001). Gran parte del potencial de este hongo radica en su capacidad de controlar muchos fitopatógenos, especialmente, hongos como *Rhizoctonia* y *Sclerotium* y oomicetos como *Pythium* y *Phytophthora*, que afectan a cultivos de interés comercial como maíz, cebolla, tomate, frijol, trigo, entre otros (Chet et al., 1981). Los principales mecanismos de acción de *Trichoderma* son la competencia por espacio físico, luz y micronutrientes, antibiosis y micoparasitismo (Mishra et al., 2020). La mayoría de las cepas de *Trichoderma* crecen en sustratos sólidos y producen una gran cantidad de conidios viables e infectivos, esta capacidad les brinda una gran ventaja competitiva para su producción masiva y ser usados como micopláguicidas.

Sustratos agroindustriales utilizados en la producción masiva de hongos

La falta de desarrollos tecnológicos económicos y rentables para producción de HE a gran escala (Soundarapandian y Chandra, 2007), limita el uso extensivo y comercialización de los micopláguicidas. La producción de micopláguicidas no debe ser basada únicamente en el rendimiento fúngico, también es necesario considerar aspectos como el costo y la disponibilidad del local e insumos (Kassa et al., 2008), además de considerar el o los sustratos de crecimiento preferidos por el hongo a cultivar (Barajas et al., 2010). La mayoría de los laboratorios reproducen los micopláguicidas en granos de arroz como sustrato, con excelentes resultados en cuanto a esporulación, ya que este sustrato les proporciona a los hongos los nutrientes necesarios para su óptimo crecimiento (De la Cruz, 2015). Sin embargo, en los lugares donde la comercialización del arroz es limitada o inaccesible, los costos por el uso de este sustrato se incrementan, impactando negativamente en la producción y comercialización de los micopláguicidas. Covenientemente, la actividad agroindustrial genera una enorme cantidad de residuos que pudieran ser reutilizados y usados como sustratos para el incremento de los micopláguicidas, y en consecuencia minimizar los impactos negativos de estos residuos hacia el medio ambiente, tales como la proliferación de plagas urbanas, contaminación de aguas, malos olores, entre otros (Barragán-Huerta et al., 2008).

En la Tabla 1 se presentan algunos residuos agroindustriales que han sido utilizados para el incremento de micopláguicidas. Otros residuos vegetales que pudieran reciclarse son el bagazo de la caña de azúcar, restos de papa, residuos de fruta, orujo de uva, paja de trigo y arroz, fibras/cascarilla de cereales, residuos de té y café, pulpa de sorgo, pasto seco picado, paja de trigo, pomaza de manzana

proveniente de la obtención de extracción de jugo, fibras de arroz y soya proveniente de la producción de bebidas, además de bagazo de cerveza y bagazo de *whisky*, entre muchos (Krishna, 2005). En otros trabajos de investigación se han probado granos de arroz limpio, trigo, cebada, maíz quebrado entre otros (Cañedo y Ames, 2004).

El bagazo de caña de azúcar es otro residuo agroindustrial promisorio para ser usado como sustrato por tener alta porosidad, baja densidad y capacidad de absorción de agua; estas características proveen un ambiente ideal para el crecimiento de hongos entomopatógenos. La mayoría de las investigaciones sobre nuevos sustratos sólidos como alternativas para la producción de micopláguicidas son artículos, tesis, congresos o un fin académico, y pocos han patentado sus investigaciones. Al respecto, Bautista (2018), refiere algunas patentes relacionadas con la producción de micopláguicidas a partir de sustratos agroindustriales, tales como residuos de mango en la producción de *T. asperellum*, arroz + levadura+miel+leche de pescado+agua, en la producción de *Metarhizium* (= *Nomuraea*) *rileyi*, pajas de maíz en la producción de *Paecilomyces lilacinus*, residuos de ginseng para la producción de *T. viride* y *T. koningii*, residuos acuosos obtenidos de almidón de papa y residuos derivados de la producción de champiñones en el incremento de *T. harzianum*.

Tabla 1

Residuos agroindustriales usados en la producción de hongos

Autor	Residuos agroindustriales	Producción
<i>Beauveria</i> spp.		
Abraham et al. (2003)	Zanahoria	2.0×10^{10} conidios por dosis de 100 gramos
Abraham et al. (2003)	Tapioca	1.7×10^{10} conidios por dosis de 100 gramos
Abraham et al. (2003)	Papa	1.6×10^{10} conidios por dosis de 100 gramos
Kim et al. (2019)	Granos de arroz	2.5×10^9 conidios por gramo
Villegas-Rodríguez (2015)	Bagazo de caña	2.5×10^8 conidios por gramo
Villegas-Rodríguez (2015)	Granos de arroz	2.6×10^9 conidios por gramo
Díaz (2015)	Cáscara de maní molida + cascarilla de arroz + levadura de cerveza	5.9×10^9 conidios por gramo
<i>Metarhizium</i> spp.		
Ángel-Cuapio y Loera (2016)	Viruta de madera y el rastrojo de maíz adicionados al arroz	6×10^8 conidios por gramo
Villegas-Rodríguez (2014)	Bagazo de uva	7.3×10^7 conidios por gramo
Villegas-Rodríguez (2014)	Bagazo de caña de azúcar	5.6×10^7 conidios por gramo
Villegas-Rodríguez (2014)	Granos de arroz	2.2×10^9 conidios por gramo

Autor	Residuos agroindustriales	Producción
Díaz (2015)	Cáscara de maní molida + cascarilla de arroz + CaCO ³	3.3×10 ⁹ conidios por gramo
<i>Isaria fumosorosea</i>		
Ángel-Cuapio y Loera (2016)	Viruta de madera y rastrojo de maíz	1×10 ¹⁰ conidios por gramo
<i>Lecanicillium lecanii</i> (= <i>Verticillium lecanii</i>)		
Cortez-Madrigal (2007)	Bagazo de caña suplementado con arroz	8.3×10 ⁶ conidios por gramo
	Sorgo + olote de maíz	8.2×10 ⁶ conidios por gramo
	Granos de arroz	2.6×10 ⁶ esporas por gramo
Díaz (2015)	Cáscara de maní molida + cascarilla de arroz + melaza de caña	3.43×10 ⁹ conidios por gramo
<i>Trichoderma harzianum</i>		
Ramírez-Bayas (2012)	Cascarilla de arroz	5×10 ¹¹ conidios por gramo
Michel et al. (2008)	Olote de maíz	4.4×10 ⁸ conidios por gramo.
López-Martínez et al. (2022)	Granos de arroz + melaza	1.3×10 ⁸ conidios por gramo
López-Martínez et al. (2022)	Granos de maíz triturados + melaza	8.1×10 ⁷ conidios por gramo

Fuente: elaboración propia.

Producción artesanal de hongos

La producción de hongos biocontroladores implica un amplio conocimiento en diversas disciplinas como patología, ecología, genética y fisiología, entre otras áreas (Butt et al., 2001). Además del dominio de técnicas y tecnologías para la producción masiva y formulación, y por supuesto, de estrategias de aplicación en cultivos hortofrutícolas y forestales en invernadero y campo abierto. En seguida, se expone un procedimiento sencillo para producción artesanal de hongos para ser usados como micoplaguicidas, empleando granos de arroz como sustrato, que se puede sustituir por cualquier grano o deshecho agroindustrial y modificar los procesos de acuerdo con las necesidades del sustrato.

1. Los granos de arroz se colocan en un contenedor de plástico y se enjuagan con abundante agua corriente para retirar completamente el exceso de almidón. Este proceso se repite varias veces hasta que el agua resultante de este proceso esté clara.
2. En el último proceso de lavado, se le adiciona un antibiótico y el arroz se deja reposando por 30 minutos
3. Posteriormente el arroz se coloca en una malla para desechar el exceso de agua por al menos 30 minutos

4. Después se colocan 300 gramos de arroz en bolsas de polipropileno y se realiza un nudo en la parte superior de la bolsa sin que quede completamente hermética.
5. Las bolsas con el sustrato se autoclavian a 120 °C a 15 libras de presión (PSI) por 15 minutos. Las bolsas con el sustrato se retiran una vez que la presión de la autoclave baja y se dejan enfriar a temperatura ambiente.
6. A la par del paso anterior, se esteriliza la campana de flujo laminar o el área destinada para la inoculación del hongo de interés. Se sugiere activar el aire de la campana, limpiar la superficie con alcohol étílico y encender la luz ultravioleta por 5 minutos, antes de encender el mechero.
7. Las bolsas de arroz se inoculan de la siguiente manera:
 - a. Seleccionar una caja de Petri con crecimiento fúngico abundante, preferentemente que tenga la mayor cantidad de conidios.
 - b. Adicionar 5 ml de agua destilada estéril y con un asa bacteriológica esterilizada raspar la mayor cantidad de conidios.
 - c. El inóculo recuperado (≈ 5 ml) se adiciona a cada bolsa con arroz.
 - d. Las bolsas con arroz inoculadas con el hongo se incuban a 28 °C, por 15 días.
 - e. Después de la incubación las bolsas con arroz y crecimiento fúngico, se abren para facilitar su deshidratación y se mantienen así, de tres a siete días. El método de secado puede influir en el control de calidad de las esporas.
 - f. El sustrato con el crecimiento fúngico se tritura en seco para la obtención de una presentación en polvo. Después de este periodo se concluye el proceso de producción.

La siguiente fase consiste en controlar la calidad del producto final, por medio de la concentración de esporas: que sean al menos 1×10^8 esporas por gramo, que la viabilidad de las esporas sea superior al 90 %, y que esté libre de microorganismos no deseados. Algunas acciones pueden favorecer la eficiencia de los micoplásmas, por ello deben tenerse en cuenta los factores ambientales como temperatura, luz, humedad, precipitación, viento, entre otros. Durante la aplicación de los micoplásmas se deben considerar lo siguiente:

- Realizar las aplicaciones a tempranas horas del día, de preferencia antes de que salga el sol o en caso contrario realizar las aplicaciones por la tarde, de preferencia cuando el sol se ponga.
- Ajustar el pH en un rango óptimo para el crecimiento del hongo.

- Agregar un aditivo o surfactante al micoplaguicida antes de ser aplicado en campo
- Evitar que el micoplaguicida se mezcle con algún fungicida o producto agroquímico.
- Evitar el uso de equipos de aplicación con restos de agroquímicos, en especial fungicidas.

Características tecnológicas para implementar una producción masiva de hongos

Durante el proceso de producción de micoplaguicidas se deben considerar dos factores: el microorganismo a utilizar y el método de producción. En cuanto al microorganismo, se debe seleccionar una cepa con rápido crecimiento micelial sobre el sustrato, alta esporulación, valores altos de virulencia o patogenicidad. En la producción se requiere de: a) medio de cultivo óptimo, b) método de producción (fermentación sólida, líquida o bifásica), c) procesos de secado, centrifugación, tamizaje), d) parámetros del proceso a controlar, d) espacio físico para reproducir un excelente sustrato, e) métodos de control de calidad, f) costos de producción, entre otros (Monzón, 2001; Ravensberg, 2011).

Conclusiones

La exigencia cada vez mayor de alimentos más saludables y con menos contaminantes por parte de la sociedad hacia el sector agroalimenticio, ha detonado la búsqueda de alternativas como el manejo de plagas y enfermedades en cultivos hortofrutícolas mediante el uso de agentes de control biológico microbianos que son más amigables con el medio ambiente y seguros para el humano. En los últimos años se ha enfatizado en el reciclado de los desechos agroindustriales, para darles un valor agregado, al ser transformados en diferentes productos, como componentes de otros agroproductos o utilizados para la producción de micoplaguicidas como una alternativa biotecnológica promisorio. “Acciones por el clima” es uno de los Objetivos del Desarrollo Sustentable (ODS) al que se puede contribuir y fortalecer desde el sector agrícola mediante la reducción del uso de agroquímicos con la consecuente reducción de envases de desecho que contaminan el ambiente y fomentando e implementando programas de reciclaje de los residuos agroindustriales.

Referencias

- Abraham, T., Easwaramoorthy, S. y Santhalakshmi, G. (2003). Mass production of *Beauveria bassiana* isolated from sugarcane root borer, *Emmalocera depresella* Swinhoe. *Sugar Tech.*, 5(4), 225-229. <https://doi.org/10.1007/BF02942477>
- Angel-Cuapio, A., y Loera, O. (2016). Use of agroindustrials waste as texturizers to entomopathogenic fungi production on solid-state culture. *Mexican Journal of Biotechnology* 2016, 1(1), 21-33.
- Arredondo, H. C., Tamayo, F. y Rodríguez, L. (2020). *Fundamento y practica del control biológico de plagas y enfermedades*. Promocionales e impresos América, S.A. de C.V. 687 pp.
- Arthurs, S., y Dara, S. (2009). Microbial biopesticides for invertebrate pests and their markets in the United States. *Journal of Invertebrate Pathology*, 165, 13-21.
- Barajas, C. G., del Pozo, E., García, I., y Méndez, A. (2010). Obtención de conidios del aislamiento MA-002 de *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin mediante una alternativa de cultivo bifásico. *Rev. Prot. Veg.*, 25(3), 174-180.
- Barragán-Huerta, B., Téllez-Díaz, T., y Laguna-Trinidad, A. (2008). Utilización de residuos agroindustriales. *Revista Sistemas Ambientales*, 2(1), 44-50.
- Bautista, E. J., Mesa, L. y Gómez Álvarez, M. (2018). Alternativas de producción de bioplaguicidas microbianos a base de hongos: el caso de América Latina y El Caribe. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 585-604. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.15>.
- Butt, T. M., Jackson, C. y Magan, N. (2001). Introduction-fungal biological control agents: progress, problems and potential. In *Fungi as biocontrol agents: progress, problems and potential* (pp. 1-8). Wallingford UK: CABI Publishing.
- Cañedo, V., y Ames, T. (2004). *Manual de laboratorio para el manejo de hongos entomopatógenos*. Lima - Perú Pub: Centro Internacional de la papa (CIP).
- Chet, I., y Baker, R. (1981). Isolation and biocontrol potential of *Trichoderma hamatum* from soil naturally suppressive to *Rhizoctonia solani*. *J. Phytopathol.*, 71, 286-290.
- Cortez-Madrigal, H. (2007). Production of *Lecanicillium* (= *Verticillium*) *lecanii* in different media and pathogenicity. *Agricultura Técnica en México*, 33(1), 83-87.
- De la Cruz Quiroz, R., S. Roussos, D. Hernández, R. Rodríguez, F. Castillo, C. Aguilar. (2015). Challenges and opportunities of the bio-pesticides production by solid-state fermentation: filamentous fungi as a model. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(3), 326-333. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.857292>.
- Díaz, C. (2015). *Optimización de sustratos a base de residuos orgánicos para la producción de hongos entomopatógenos: Beauveria bassiana, Lecanicillium lecanii y Metarhizium anisopliae* (Doctoral dissertation, Tesis para obtener el Título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú).

- Kassa, A., Brownbridge, M., Parker, B., Skinner, M., Gouli, V., Gouli, S., Guo, M., Lee, F., y Hata, T. (2008). Whey for mass production of *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*. *Mycol. Res.*, 112, 583-591. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2007.12.004>
- Kim, J. C., Lee, M. Kim, S. Lee, S., Park, S. Baek, S., Kim, J. (2019). Long-term storage stability of *Beauveria bassiana* ERL836 granules as fungal biopesticide. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(2), 537-542. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.04.001>
- Krishna, C. (2005). Solid - State fermentation systems. An overview. *Crit. Rev. Biotechnol.*, 25, 1-30. <https://doi.org/10.1080/07388550590925383>
- López-Martínez, T., Aguilera, L., y Silva, H. (2022). Reproducción masiva de hongos Trichodermas previamente identificados de suelos nicaragüenses en diferentes sustratos orgánicos. *Nexo. Revista Científica*, 35(03), 700-712. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i03.15000>
- Mahawar, M., Singh, A., y Jalgaonkar, K. (2012). Utility of apple pomace as a substrate for various products: A review. *Food and Bioprod. Process.*, 90, 597-605. DOI:10.1016/j.fbp.2012.04.007
- Maller, A., Lima-Damasio, A., da Silva, T., Jorge, J., Terenzi, H., y Polizeli, M. (2011). Biotechnological potential of agro industrial wastes as a carbon source to thermostable polygalacturonase production in *Aspergillus niger*. *Enz. Res.* DOI:10.4061/2011/289206
- Michel-Aceves, A. C., Otero-Sánchez, M., Martínez-Rojero, R., Rodríguez-Morán, N., Ariza-Flores, R., y Barrios-Ayala, A. (2008). Producción masiva de *Trichoderma harzianum* Rifai en diferentes sustratos orgánicos. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 14(2), 185-191. DOI: 10.5154/r.rchsh.2005.09.036.
- Mishra, R. K., Pandey, S., Mishra, M., Rathore, Q., Kumar, K., y Singh, B. (2020). Assessment of biocontrol potential of *Trichoderma* isolates against wilt in pulses. *Journal of Food Legumes*, 33(1), 48-52.
- Monzón, A. (2001). Producción, uso y control de calidad de hongos entomopatógenos en Nicaragua. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)*, 63, 95-103.
- Ramírez-Bayas, S. G. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales, cascarilla de arroz (Oriza sativa) y residuos de papa (Solanum tuberosum) para la producción de Trichoderma spp.* (Tesis para obtener el título de licenciatura por la Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos de la carrera de Ingeniería Bioquímica.
- Ravensberg, W. J. (2011). *A Roadmap to the Successful Development and Commercialization of Microbial Pest Control Products for Control of Arthropods*. Springer Netherlands. 376 pp. DOI: 10.1007/978-94-007-0437-4.
- Seiber, J. N., Coats, J., Duke, S. O., y Gross, A. D. (2014). Biopesticides: state of the art and future opportunities. *J. Agric. Food Chem.*, 62(48), 11613-11619.

- Soundarapandian, P., y Chandra, R. (2007). Mass production of entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* (Deuteromycota; Hyphomycetes) in the laboratory. *Res. J. Microb.*, 2(9), 690-695. DOI: 10.3923/jm.2007.690.695.
- Villegas Rodríguez, F. (2015). *Evaluación y producción masiva de hongos entomopatógenos para el manejo del psílido de la papa (Bactericera cockerelli Sulc) en cultivos de tomate (Solanum lycopersicum L.) y chile (Capsicum annuum L.) en invernadero* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Capítulo 10

Producción de biosurfactantes microbianos a partir de subproductos agrícolas

Microbial biosurfactant production from agricultural by-products

¹*María Alejandra Pichardo Sánchez*

²*Yulisa Montserrat Gutiérrez Olvera*

²*Nadia Adelina Rodríguez Durán*

²*Luis Víctor Rodríguez Durán**

Resumen

Los biosurfactantes son moléculas con una fracción hidrofílica y otra hidrofóbica, los cuales son sintetizados por algunas bacterias, hongos filamentosos y levaduras; tienen un desempeño similar a los surfactantes de origen químico, pero son biodegradables y pueden ser obtenidos de fuentes renovables. La producción y uso de los biosurfactantes representa una opción sustentable respecto a los surfactantes químicos. Los biosurfactantes tienen una amplia gama de aplicaciones en campos como biorremediación, en industria petrolera y, en algunos casos, pueden tener aplicaciones biomédicas y farmacéuticas. La producción de biosurfactantes se realiza en sistemas de cultivo sumergido y está limitada por los costos de producción. Una de las estrategias empleadas para disminuir los costos de producción es la utilización de residuos agroindustriales como fuente de carbono económica. Entre los subproductos más usados, se encuentran la melaza de caña de azúcar y subproductos de la refinación de aceites vegetales. El empleo de subproductos contribuye a una economía circular y a la reducción de los costos de producción para la obtención de moléculas con alto valor agregado. En el presente capítulo se describen los principales tipos de biosurfactantes, los microorganismos utilizados

¹Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma, CP 09340, Iztapalapa, Ciudad de México.

² Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Boulevard E. Cárdenas González No. 1201 Poniente, Col. Jardín, CP 89840, Cd. Mante, Tamaulipas.

* Autor de correspondencia: luis.duran@docentes.uat.edu.mx

para su producción, así como algunos ejemplos de procesos para la obtención de biosurfactantes a partir de subproductos agroindustriales.

Palabras clave: biosurfactantes, subproductos, glicolípidos, lipopéptidos.

Summary

Biosurfactants are molecules with a hydrophilic and a hydrophobic fraction, which are synthesized by several bacteria, filamentous fungi, and yeasts. Biosurfactants have similar performance to surfactants of chemical origin, but they are completely biodegradable and can be obtained from renewable sources. Therefore, the production and use of biosurfactants represents a more sustainable option than chemical surfactants. Biosurfactants have a wide range of applications in fields such as bioremediation, in the oil industry, and in some cases, may have biomedical and pharmaceutical applications. Currently the production of biosurfactants is carried out in submerged culture systems and is limited by production costs. One of the strategies that has been implemented to reduce production costs is the use of agro-industrial residues as an economic carbon source. Among the most used by-products are sugar cane molasses and by-products from the refining of vegetable oils. The use of by-products contributes to a circular economy and the reduction of production costs to obtain molecules with high added value. This chapter describes the main types of biosurfactants, the microorganisms used for their production, as well as some examples of processes for obtaining biosurfactants from agro-industrial by-products.

Keywords: biosurfactants, by-products, glycolipids, lipopeptides.

Introducción

Los surfactantes, también conocidos como agentes tensoactivos, son moléculas orgánicas con una porción polar e hidrofílica y una porción no polar e hidrofóbica, o bien con segmentos que son hidrofílicos e hidrofóbicos a la vez. Debido a esto, cuando se agrega un surfactante a un líquido, reduce la tensión superficial del líquido y mejora su capacidad para esparcirse y humedecer las superficies (Verma et al., 2023). Los surfactantes se utilizan en una variedad de aplicaciones, funcionan como detergentes, agentes humectantes, emulsionantes y agentes espumantes. Los surfactantes se encuentran en productos industriales y de consumo, como alimentos, productos para el cuidado de la salud, pinturas y recubrimientos, además se utilizan en muchos procesos industriales, como la recuperación de petróleo y en impresión (Johnson et al., 2021).

Los surfactantes se pueden clasificar por su origen en surfactantes derivados del petróleo, de base biológica y de base parcialmente biológica. A su vez, los

surfactantes de base biológica, también conocidos como biosurfactantes, pueden ser extraídos directamente de material vegetal, producidos por síntesis química a partir de materiales renovables u obtenidos mediante procesos biológicos como el cultivo microbiano (Roelants y Soetaert, 2022).

Los biosurfactantes microbianos son moléculas sintetizadas por bacterias, levaduras y hongos. Una parte de la molécula es hidrofílica, como los aminoácidos, los péptidos o los carbohidratos y la otra parte es hidrofóbica que regularmente está constituida por ácidos grasos saturados o insaturados (Kaczorek et al., 2018). Son metabolitos secundarios producidos en la fase estacionaria del crecimiento (Varjani y Upasani, 2017). Los biosurfactantes microbianos pueden ser secretados o permanecer en la pared celular, con la finalidad de disminuir la tensión superficial y utilizar los sustratos hidrofóbicos para el crecimiento microbiano (Hausmann y Syldatk, 2014).

El objetivo del presente capítulo es revisar los principales tipos de biosurfactantes, los microorganismos utilizados para su producción, así como algunos ejemplos de procesos para la obtención de biosurfactantes a partir de subproductos agroindustriales.

Clasificación de los biosurfactantes

Los biosurfactantes microbianos pueden separarse en dos grupos: los de bajo peso molecular (menores a 10 kDa) y los de alto peso molecular (mayores a 10 kDa) (Varjani y Upasani, 2017). Por su estructura química, los biosurfactantes microbianos pueden clasificarse en cinco grupos principales, como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1
Clasificación de los biosurfactantes

Grupo	Subgrupo	Clase
Bajo peso molecular	Glicolípidos	Ramnolípidos
		Soforolípidos
		Trehalolípidos
		Lípidos de manosil-eritritol
	Lipopéptidos (LP)	LP relacionados con <i>Bacillus</i>
		LP relacionados con <i>Pseudomonas</i>
		LP relacionados con otras bacterias
		LP relacionados con hongos

Grupo	Subgrupo	Clase
	Ácidos grasos, lípidos neutros y fosfolípidos	Ácidos grasos
		Lípidos neutros
		Fosfolípidos
Alto peso molecular	Surfactantes poliméricos	Emulsan
		Biodispersan
		Alasan
		Liposan
	Partículas surfactantes	Vesículas y fimbrias
		Células completas

Fuente: elaboración propia.

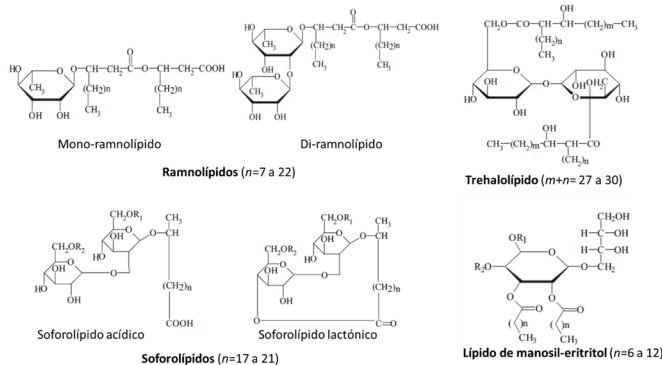
Cada grupo de biosurfactantes presenta propiedades fisicoquímicas distintas y funciones fisiológicas específicas en los microorganismos productores.

Glicolípidos

Los glicolípidos están formados por una unidad de carbohidrato y otra de ácido graso, el contenido de mono u oligosacáridos ligados a una cadena larga de un ácido graso alifático o hidroxialifático es la base para su clasificación en cuatro grupos importantes: ramnolípidos, soforolípidos, trehalolípidos y lípidos de manosil-eritritol. El sacárido puede ser ramnosa, soforosa, trehalosa o manosa (Smyth et al., 2016). En la Figura 1 se muestra la estructura general de los glicolípidos.

Figura 1

Estructura básica de las cuatro principales clases de glicolípidos biosurfactantes



Fuente: elaboración propia.

Los glicolípidos microbianos, dependiendo de su estructura específica, pueden disminuir la tensión superficial e interfacial, pueden tener la capacidad de emulsificación o desemulsificación, pueden ser espumantes, tener la habilidad de solubilización y la capacidad de formación de poros. Además, estos compuestos son reconocidos por su gran estabilidad y buen desempeño tanto en condiciones suaves como en condiciones extremas de pH, salinidad y temperatura. Por lo tanto, son útiles en el campo ambiental para mejorar la solubilidad, movilidad y biodegradación de los hidrocarburos (Ahmadi-Ashtiani et al., 2020). Por otra parte, algunos compuestos que pertenecen a esta clase tienen actividades antimicrobianas, hemolíticas, antivirales, anticancerígenas e inmunomoduladoras, por lo que tienen potenciales aplicaciones médicas (Fakruddin, 2012).

Lipopéptidos

Las moléculas de lipopéptido (LP) tienen una región hidrófoba que incluye una cadena hidrocarbonada y una cabeza hidrófila, incluye una secuencia peptídica, la cual puede ser una cadena abierta o cíclica. Los residuos catiónicos y aniónicos están disponibles en la porción peptídica (Carolín et al., 2021). Generalmente se producen como una mezcla de isoformas que difieren en la secuencia peptídica, la longitud de la cadena de ácido graso o el enlace entre ambas porciones. Los LP biosurfactantes se clasifican por su origen en: LP relacionados con *Bacillus*, LP relacionados con *Pseudomonas*, LP relacionados con otras bacterias y LP relacionados con hongos. La surfactina, la iturina, la fengicina y la liquenisina son de los LP más estudiados y pertenecen todos a la familia de los LP relacionados con *Bacillus* (Inès y Dhouha, 2015).

Los LP son surfactantes altamente eficientes, ya que reducen la tensión superficial del agua de 72 mN/m a 30 mN/m o menos con una concentración micelar crítica (CMC) de 13 a 250 mg/L. Algunos LP tienen actividad emulsificante y otros no tienen actividad emulsificante. La surfactina tiene excelentes propiedades espumantes. Varios LP, incluyendo la surfactina y la fengicina, inhiben la adhesión de bacterias patógenas a superficies sólidas, por lo cual tiene potenciales aplicaciones en la industria de alimentos y en biomedicina (Mnif y Ghribi, 2015).

Ácidos grasos, lípidos neutros y fosfolípidos

Los fosfolípidos, ácidos grasos y lípidos neutros son componentes de las estructuras celulares y algunos tienen actividad superficial (Varjani y Upasani, 2017). Varias bacterias y hongos producen ácidos grasos libres con actividad surfactante durante el cultivo en n-alcenos. La mayor actividad surfactante se debe a ácidos grasos con longitudes de cadena de 12 a 14 carbonos, aunque se han descrito ácidos

grasos complejos, como los ácidos corinomicólicos, con propiedades tensioactivas comparables. Estos ácidos grasos complejos generalmente tienen uno o más grupos hidroxilo o residuos alquilo (Henkel y Hausmann, 2019). Por otra parte, *Rhodococcus erythropolis* produce un biosurfactante extracelular que consiste en una mezcla de glicolípidos, fosfolípidos y lípidos neutros (Pirog y Ignatenko, 2011).

Los fosfolípidos son lípidos polares que constan de un esqueleto de glicerol con dos ácidos grasos y un grupo fosfato unidos. Las cadenas de ácidos grasos forman la cola hidrofóbica, mientras que el grupo fosfato y cualquier grupo adjunto forman la cabeza hidrófila polar (McClements y Gumus, 2016). Los fosfolípidos son la parte principal de las membranas microbianas y normalmente no están presentes en forma extracelular. Sin embargo, *Acinetobacter* sp. HO1-N forma y excreta vesículas de fosfolípidos con un fuerte efecto tensioactivo al crecer en hexadecano (Hausmann y Syltatk, 2014). También se ha reportado la producción de fosfolípidos extracelulares por *Pseudomonas putida* (Janek et al., 2013), *Sphingobacterium* sp. (Burgos-Díaz et al., 2011) y *Micrococcus* sp. (Liu et al., 2014).

Surfactantes poliméricos

Los biosurfactantes poliméricos son sintetizados por varias bacterias y están formados por lipopolisacáridos, polisacáridos y proteínas. Los biosurfactantes poliméricos son menos efectivos para disminuir la tensión superficial que los biosurfactantes de bajo peso molecular, pero son más efectivos para estabilizar emulsiones de agua en aceite. Por ello, también se les conoce como bioemulsionantes (Bagheri et al., 2022). Algunos de los biosurfactantes poliméricos más conocidos son: *emulsan*, *biodispersan*, *alasan* y *liposan*.

El *emulsan* es un lipoheteropolisacárido anfipático de un peso molecular de alrededor de 1000 kDa producido extracelularmente por bacterias del género *Acinetobacter* durante la fase de crecimiento estacionario. La cadena principal consta de D-galactosamina, ácido urónico D-galactosamina y 2,4-diamino-6-desoxi-D-glucosamina, y las propiedades anfipáticas del polímero son conferidas por cadenas laterales de ácidos grasos unidas a través de enlaces N- y O-acilo a la cadena del polisacárido (Castro et al., 2009).

El *biodispersan*, es un agente dispersante extracelular no dializable producido por *Acinetobacter calcoaceticus*, el cual consiste en un heteropolisacárido aniónico que contiene 4 azúcares reductores que incluyen glucosamina, 6-metileaminoxihexosa, galactosamina, ácido urónico y aminoazúcar no identificado. El *alasan* es un complejo de biosurfactante aniónico de heteropolisacárido-proteína producido por *Acinetobacter radioresistens* que contiene alanina y una parte proteica, que regula su estructura y actividad (Jahan et al., 2020).

El *liposan* es un emulsificante hidrosoluble producido extracelularmente por la levadura *Candida lipolytica*. Consta de 83 % de carbohidratos y 17 % de proteínas. La parte carbohidrato es un heteropolisacárido, compuesto por moléculas de glucosa, galactosa, galactosa-amina y ácido galacturónico. La presencia de fracciones de proteína en la molécula del polímero es esencial para sus propiedades emulsionantes (Alizadeh-Sani et al., 2018).

Partículas surfactantes

Las partículas biosurfactantes utilizan vesículas de membranas extracelular para formar una microemulsión que influye en la absorción de alcanos en las células microbianas. Por ejemplo, *Acinetobacter* spp. forma vesículas con un diámetro de 20 a 50 nm compuestas de proteínas, fosfolípidos y lipopolisacáridos (Santos et al., 2016).

Aplicaciones de los biosurfactantes

En la vida cotidiana, se utilizan productos que contienen surfactantes, por ejemplo, champú, cremas cosméticas, jabones, etcétera. Las propiedades de los biosurfactantes son de gran interés en la industria, porque podrían reemplazar surfactantes sintéticos por sustancias de igual desempeño, pero de origen natural y amigables con el medio ambiente (Marchant y Banat, 2012).

La baja toxicidad, alta biodegradabilidad, biocompatibilidad y el desempeño óptimo de los biosurfactantes en altas temperaturas y en ambientes adversos son razones que los convierten en alternativas potenciales. Algunos biosurfactantes muestran actividad biológica, por lo que se emplean en aplicaciones biomédicas y farmacéuticas. Otros tienen aplicaciones ambientales como la biorremediación, la dispersión de hidrocarburos en derrames de petróleo; también pueden emplearse en la extracción de petróleo crudo (Pedraza-Segura et al., 2021).

Los biosurfactantes pueden ser utilizados para desemulsificar el petróleo crudo, en la síntesis de nuevos polímeros, como aditivos de cosméticos y en la síntesis de bioplásticos. Sin embargo, el uso de biosurfactantes en estas aplicaciones actualmente está limitado por los costos de producción, que son muy altos en comparación de los de los surfactantes sintéticos (Jimoh y Lin, 2019).

Producción de biosurfactantes microbianos

La principal función fisiológica de los biosurfactantes microbianos es permitir que las células microbianas crezcan en sustratos insolubles en agua mediante la reducción de la tensión superficial entre fases, lo que hace que el sustrato hidrofóbico esté más disponible para la absorción y el metabolismo (Sarubbo et al., 2022).

La producción comercial de biosurfactantes microbianos se realiza principalmente por cultivo líquido sumergido. Para obtener una producción óptima de biosurfactantes, debe considerarse la selección del microorganismo -ya que este define las condiciones de cultivo-, las fuentes de carbono y nitrógeno, concentración de sustrato lipofílico, micronutrientes disponibles, tamaño de inóculo, temperatura, pH, aireación y velocidad de agitación. Los parámetros químicos y físicos de la fermentación pueden ser optimizados utilizando métodos estadísticos que evalúen las diferentes variables y sus interacciones para maximizar la producción de biosurfactantes (Bertrand et al., 2018).

La fuente de carbono y de nitrógeno es lo primero a considerar, ya que influye en el crecimiento de los microorganismos, así como en la estructura de los biosurfactantes, el rendimiento obtenido y los costos de producción (Hošková et al., 2015; Jimoh y Lin, 2019). En la literatura se encuentra una gran variedad de fuentes de carbono empleadas para la producción de biosurfactantes. La mayoría de las investigaciones se han realizado con medios de cultivo definidos, utilizando una mezcla de fuentes de carbono hidrofílicas e hidrofóbicas. Por otra parte, el empleo de subproductos agroindustriales puede disminuir los costos de producción y contribuye a la economía circular (Gaur et al., 2022).

Uso de subproductos agroindustriales

Las principales limitaciones de la producción de biosurfactantes con respecto a los surfactantes químicos son el menor rendimiento y los mayores costos de producción, que reducen su uso en diversas aplicaciones. Esto se puede superar mediante el uso de sustratos económicos, como los subproductos agroindustriales para su producción. Se estima que la sustitución de los sustratos puede reducir el costo de producción de los biosurfactantes entre un 10 % y un 30 % (Carolín et al., 2023). Por ello, diversos autores han estudiado el uso de subproductos agrícolas para la producción de biosurfactantes microbianos (Tabla 2).

Tabla 2*Ejemplos de biosurfactantes producidos a partir de subproductos agroindustriales*

Biosurfactante	Microorganismo	Fuente de carbono	Fuente de nitrógeno	Concentración (g/L)	Referencia
Ramnolípidos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Melaza de caña	Licor de maceración de maíz	3.2	(Gudiña et al., 2015)
Ramnolípidos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Melaza de caña y agua residual del procesamiento de la oliva	Licor de maceración de maíz	5.1	(Gudiña et al., 2016)
Ramnolípidos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Subproducto de la refinación del aceite	NaNO ₃	11.7	(Nitschke et al., 2010)
Soforolípidos	<i>Starmerella bombicola</i>	Melaza de caña	Ninguna	22.8	(Takahashi et al., 2011)
Soforolípidos	<i>Starmerella bombicola</i>	Melaza de caña y aceite de soya	Urea y extracto de levadura	63.7	(Daveray y Pakshirajan, 2009)
Soforolípidos	<i>Candida albicans</i>	Melaza de caña y aceite de soya	Sulfato de sodio y extracto de levadura	108.7	(Yang et al., 2012)
Lípidos de manosil eritritol	<i>Pseudozyma tsukubaensis</i>	Aguas residuales del procesamiento de la yuca	Ninguna	1.26	(Andrade et al., 2017)
Lípidos de manosil eritritol	<i>Pseudozyma aphidis</i>	Subproducto de la refinación del aceite	Permeado de suero de leche	90	(Dzięgielewska y Adamczak, 2013)
Lípidos de manosil eritritol	<i>Pseudozyma antarctica</i>	Subproducto de la refinación del aceite	Permeado de suero de leche	40	(Dzięgielewska y Adamczak, 2013)
Lipopéptido	<i>Bacillus pumilus</i>	Vinazas	NaNO ₃	27.7	(Oliveira yGarcia-Cruz, 2013)
Lipopéptido	<i>Bacillus subtilis</i>	Melaza de caña	Ninguna	12.34	(Verma et al., 2020)
Lipopéptido	<i>Bacillus safensis</i>	Bagazo de caña	NaNO ₃ y NH ₄ NO ₃	0.92	(Das y Kumar, 2019)
Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	Jugo del fruto del anacardo	Sulfato de amonio	0.319	(Freitas de Oliveira et al., 2013)
Emulsan	<i>Acinetobacter venetianus</i>	Melaza de soya y sebo	Ninguna	n.d.	(Panilaitis et al., 2007)

Biosurfactante	Microorganismo	Fuente de carbono	Fuente de nitrógeno	Concentración (g/L)	Referencia
Lipo-polisacárido	<i>Acinetobacter bouvetii</i>	Aceite de cocina usado	NaNO ₃	n.d.	(Ortega-de la Rosa et al., 2018)
Lipo-polisacárido	<i>Trichosporon mycotoxinivorans</i>	Residuo de la refinación del biodiésel	Sulfato de amonio y extracto de levadura	n.d.	(De Souza Monteiro et al., 2012)
Lipoproteína	<i>Streptomyces</i> sp.	Aceite de soya usado	Licor de maceración de maíz	1.9	(Santos et al., 2019)

(fuente:?)

Producción de ramnolípidos

Los ramnolípidos son producidos casi exclusivamente por bacterias de los géneros *Pseudomonas* y *Burkholderia*. Se han reportado producciones de 3.9 a 78.56 g/L de ramnolípidos dependiendo del microorganismo, composición del medio y condiciones de cultivo (Chong y Li, 2017). *P. aeruginosa* es el mejor productor de ramnolípidos, puede sintetizar estos biosurfactantes a partir de azúcares, glicerol, n-alcanos, aceites e hidrocarburos aromáticos policíclicos, pero la mayor productividad se alcanza usando sustratos oleosos (Tan y Li, 2018). Se estima que el costo de las materias primas para la fermentación de ramnolípidos representa alrededor del 50% del costo total (Chong y Li, 2017), por lo que existe interés en la sustitución de los sustratos definidos por subproductos agroindustriales para disminuir los costos en la producción de ramnolípidos a escala industrial.

Gudiña et al. (2015) evaluaron de producción de ramnolípidos por *P. aeruginosa* #112 utilizando subproductos agroindustriales como fuente de carbono. La mayor producción de biosurfactantes (3.2 g/L) la obtuvieron con una mezcla de melaza de caña de azúcar y licor de remojo de maíz. En estudios posteriores encontraron que, agregando agua residual del procesamiento de la oliva, la producción de ramnolípidos se puede incrementar hasta 5.1 g/L (Gudiña et al., 2016).

Nitschke et al. (2010) estudiaron la producción de ramnolípidos por *P. aeruginosa* LBI usando un subproducto de la refinación del aceite de soya (*soapstock*) como fuente de carbono y obtuvieron una concentración de 11.7 g/L y un rendimiento del 75% con respecto al carbono a las 144 h de cultivo. El biosurfactante mostró efectividad para remover petróleo de arena contaminada, así como efecto antibacteriano en contra de *Bacillus cereus* and *Mucor miehei* y efecto inhibitorio contra *Neurospora crassa*, *Staphylococcus aureus* y *Micrococcus luteus*.

Producción de soforolípidos

Los soforolípidos consisten en una cadena hidrofóbica de ácido graso hidroxilado y una cabeza hidrofílica de soforosa. La cadena de ácido graso puede estar unida en uno o dos puntos a la molécula de soforosa, dando origen a los soforolípidos ácidos y lactónicos (Li et al., 2016). Los soforolípidos tienen excelentes propiedades de tensión superficial e interfacial. Además, tienen efectos antimicrobianos, antiinflamatorios, espermicidas, anti-VIH e incluso anticancerígenos, lo que permite el uso de estas moléculas en la industria cosmética, farmacéutica y para fines de biorremediación (Jiménez-Peñalver et al., 2019).

Los soforolípidos son producidos por algunas levaduras de los géneros *Starmerella*, *Candida*, *Rhodotorula*, *Pseudohyphozyma*, *Cryptococcus*, *Cyberlindnera*, *Lachancea* y *Wickerhamiella* (Roelants et al., 2019). *Starmerella bombicola* (antes conocida como *Candida bombicola*) es el microorganismo más eficiente para la producción de soforolípidos. *S. bombicola* produce cantidades traza de biosurfactantes cuando crece con glucosa como única fuente de carbono. Sin embargo, cuando se adiciona una fuente de carbono hidrofóbica al medio de cultivo, la producción de soforolípidos aumenta significativamente. Por ejemplo, Pekin et al. (2005) obtuvieron soforolípidos de *S. bombicola* ATCC 22214 usando aceite de maíz y miel como sustratos, obteniendo una concentración de soforolípidos mayor a 400 g/L en un sistema de lote alimentado.

Varios investigadores han evaluado la sustitución de los componentes del medio de cultivo con la finalidad de reducir los costos de producción. Estos esfuerzos se han enfocado principalmente en la sustitución del sustrato hidrofílico. Por ejemplo, Takahashi et al. (2011) evaluaron la producción de soforolípidos por 15 cepas de levaduras usando melaza de caña como única fuente de carbono. Ellos obtuvieron una concentración de 14.4 g/L de soforolípidos a las 120 h de incubación en un cultivo en lote con *S. bombicola*. La concentración del producto se incrementó 1.6 veces en un sistema de cultivo en lote alimentado. Daverey y Pakshirajan (2009) estudiaron la producción de soforolípidos por *S. bombicola* en un medio de cultivo con melaza de caña, extracto de levadura, urea y aceite de soya. La concentración de soforolípidos fue de 63.7 g/L. Yang et al. (2012) obtuvieron una concentración de 108.7 g/L de soforolípidos de *Candida albicans* O-13-1 en un cultivo en lote alimentado usando melaza de caña y aceite de soya como fuentes de carbono.

Producción de lípidos de manosil-eritritol

Los lípidos de manosil-eritritol (MELs) son ácidos grasos de cadena larga que contienen 4-*O*- β -D-manopiranosil-eritritol o 1-*O*- β -D manopiranosil-eritritol como el grupo hidrofílico, el cual está unido a una variedad de ácidos grasos como

cadena hidrofóbica (Morita et al., 2015). Los MELs pueden ser usados en productos como detergentes y dispersantes debido a sus altas propiedades hidrofílicas y baja concentración micelar crítica. Su baja toxicidad y compatibilidad con la piel los hacen candidatos potenciales para su uso futuro en la industria cosmética (Mujumdar et al., 2017).

Los MELs son producidos principalmente por levaduras del género *Pseudozyma*, como: *P. tsukubaensis*, *P. churashimaensis*, *P. antarctica*, *P. aphidis*, *P. hubeiensis*, *P. crassa* y *P. siamensis*, y algunos hongos del género *Ustilago* (Paulino et al., 2017). La producción biotecnológica de estos biosurfactantes se ha reportado principalmente como metabolitos secundarios en cultivos líquidos utilizando aceites vegetales u otros sustratos hidrofóbicos como única fuente de carbono. En estas condiciones se alcanzan concentraciones de biosurfactante en el rango de 30-40 g/L (Rau et al., 2005). Por otra parte, la adición de sustratos hidrofílicos incrementa significativamente la producción de MELs por estos microorganismos. Utilizando aceite de soya y manosa o eritritol como fuente de carbono, se han obtenido concentraciones de MELs de hasta 75 g/L en cultivos en lote (Rau et al., 2005). Usando aceite de soya y glucosa como fuentes de carbono, se han obtenido hasta 165 g/L de MELs en cultivos en lote alimentado (Rau et al., 2005).

Se han realizado varios intentos por producir MELs utilizando subproductos agroindustriales como sustratos. Por ejemplo, Andrade et al. (2017) usaron aguas residuales del procesamiento de la yuca como medio de cultivo para la producción de MELs por *P. tsukubaensis*, obteniendo 1.26 g/L del MEL B. Por otra parte, Dziegielewska y Adamczak (2013), obtuvieron 90 g/L de MELs con *P. aphidis* usando un medio de cultivo que contenía subproducto de la refinación del aceite y permeado de suero de leche, mientras que con *P. antarctica* obtuvieron aproximadamente 40 g/L de MELs.

Producción de lipopéptidos (LP)

Los LP son biosurfactantes altamente eficientes producidos por una amplia variedad de bacterias, hongos filamentosos y levaduras. La surfactina, la iturina y la fengicina están entre los lipopéptidos más estudiados y son producidas por bacterias del género *Bacillus* a partir de sustratos miscibles e inmiscibles en agua. Generalmente, los componentes del medio de cultivo representan del 10 al 30 % de los costos totales de producción, por lo que se ha estudiado cómo sustituir los sustratos definidos por subproductos agroindustriales (Inès y Dhouha, 2015).

Oliveira y Garcia-Cruz (2013) estudiaron la producción de lipopéptidos de *Bacillus pumilus* CCT 2487 a partir de vinazas y aceite de cocina usado como fuentes de carbono alternativas. Ellos obtuvieron 27.7 y 5.7 g/L de biosurfactante

crudo a partir de vinazas y aceite de cocina usado al 5 %, respectivamente. Estos biosurfactantes tuvieron una CMC de 1.5 y 0.2 g/L. Verma et al. (2020) utilizaron melaza de caña como único nutriente para la producción de lipopéptidos por *Bacillus subtilis* RSL-2. Después de optimizar las variables del proceso obtuvieron 12.34 g/L de biosurfactante con una CMC de 80 mg/L. Das y Kumar (2019) evaluaron el bagazo de caña como sustrato para producir lipopéptidos de *Bacillus safensis* J2 obteniendo 0.92 g/L de biosurfactante. El lipopéptido fue capaz de remover el 46.5 % del petróleo atrapado en una columna de arena empacada. Freitas de Oliveira et al. (2013) estudiaron la producción de surfactina (un biosurfactante de naturaleza lipopeptídica) por *Bacillus subtilis* LAMI005 usando jugo del fruto del anacardo. Ellos obtuvieron hasta 319 mg de surfactina por litro, con una CMC de 63.0 mg/L.

Producción de biosurfactantes poliméricos

Los biosurfactantes poliméricos, también conocidos como bioemulsionantes, son biomoléculas de alto peso molecular sintetizadas por algunas bacterias y compuestas de lipopolisacáridos, polisacáridos y proteínas (Bagheri et al., 2022). Las bacterias del género *Acinetobacter* han sido las más estudiadas para la producción de este tipo de compuestos. *Acinetobacter* spp. se utiliza para la producción industrial de los bioemulsionantes comerciales *emulsan*, *biodispersan* y *alasan*. Estos compuestos pueden ser obtenidos de diferentes fuentes de carbono hidrofílicas e hidrofóbicas como: glucosa, etanol, ácido láctico, glicerol, aceite comestible, n-hexadecano, n-heptadecano, petróleo crudo, entre otros. La fuente de carbono utilizada afecta la composición del biopolímero (Mujumdar et al., 2019).

Diversos autores han empleado subproductos agroindustriales para obtener biosurfactantes poliméricos. Por ejemplo, Panilaitis et al. (2007) emplearon subproductos agroindustriales (melaza de soya y cebo) para la producción de *emulsan* por *Acinetobacter venetianus* y los compararon con el *emulsan* obtenido a partir de etanol. Ellos encontraron diferencias estructurales entre los polímeros obtenidos a partir de las diferentes fuentes de carbono. Estas diferencias químicas afectan las propiedades fisicoquímicas y las actividades biológicas del *emulsan*. Ortega-de la Rosa et al. (2018) obtuvieron un lipopolisacárido de *Acinetobacter bouvetii* a partir de aceite de cocina usado. De Souza Monteiro et al. (2012) usaron el subproducto de la producción de biodiésel para la producción de un lipopolisacárido por *Trichosporon mycotoxinivorans* CLA2. Santos et al. (2019) obtuvieron un biosurfactante de *Streptomyces* sp. a partir de aceite de soya usado y licor de maceración de maíz. El biosurfactante fue caracterizado como una lipoproteína a la cual denominaron *bioelan*.

Conclusiones

Los biosurfactantes son moléculas de origen biológico que pueden sustituir a los surfactantes en múltiples aplicaciones industriales, biomédicas y de biorremediación. Las principales limitantes para la aplicación comercial de estos productos son el rendimiento y los costos de producción. La sustitución de las fuentes de carbono y nitrógeno definidas por subproductos agroindustriales puede contribuir a la disminución de los procesos de producción. Sin embargo, los rendimientos en muchas ocasiones son menores a los obtenidos con medios de cultivo definido. Por ello es necesario seguir desarrollando procesos más eficientes y sustentables para la obtención de estos bioproductos.

Referencias

- Ahmadi-Ashtiani, H.-R., Baldissierotto, A., Cesa, E., Manfredini, S., Sedghi Zadeh, H., Ghafori Gorab, M., Khanahmadi, M., Zakizadeh, S., Buso, P., y Vertuani, S. (2020). Microbial biosurfactants as key multifunctional ingredients for sustainable cosmetics. *Cosmetics*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/cosmetics7020046>
- Alizadeh-Sani, M., Hamishehkar, H., Khezerlou, A., Azizi-Lalabadi, M., Azadi, Y., Nattagh-Eshtrivani, E., Fasihi, M., Ghavami, A., Aynehchi, A., y Ehsani, A. (2018). Bioemulsifiers derived from microorganisms: applications in the drug and food industry. *Advanced Pharmaceutical Bulletin*, 8(2), 191-199. <https://doi.org/10.15171/apb.2018.023>
- Andrade, C. J. d., Andrade, L. M. d., Rocco, S. A., Sforça, M. L., Pastore, G. M., y Jauregi, P. (2017). A novel approach for the production and purification of mannosylerythritol lipids (MEL) by *Pseudozyma tsukubaensis* using cassava wastewater as substrate. *Separation and Purification Technology*, 180, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.045>
- Bagheri, H., Mohebbi, A., Amani, F. S., y Naderi, M. (2022). Application of low molecular weight and high molecular weight biosurfactant in medicine/biomedical/pharmaceutical industries. In Inamuddin, C. O. Adetunji, y M. I. Ahamed (Eds.), *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 1-60). Academic Press. Statistical design, a powerful tool for optimizing biosurfactant production: a review. *Colloids and Interfaces*, 2(3). <https://doi.org/10.3390/colloids2030036>
- Burgos-Díaz, C., Pons, R., Espuny, M. J., Aranda, F. J., Teruel, J. A., Manresa, A., Ortiz, A., y Marqués, A. M. (2011). Isolation and partial characterization of a biosurfactant mixture produced by *Sphingobacterium* sp. isolated from soil. *Journal of Colloid and Interface Science*, 361(1), 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.05.054>
- Carolin C, F., Kumar, P. S., y Ngueagni, P. T. (2021). A review on new aspects of lipopeptide biosurfactant: Types, production, properties and its application in the bioremediation

- process. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124827. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124827>
- Carolín C, F, Senthil Kumar, P, Mohanakrishna, G., Hemavathy, R. V., Rangasamy, G., y M Aminabhavi, T. (2023). Sustainable production of biosurfactants via valorisation of industrial wastes as alternate feedstocks. *Chemosphere*, 312, 137326. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 20(4), 411-426. <https://doi.org/10.1163/156856209X416449>.
- Chong, H., y Li, Q. (2017). Microbial production of rhamnolipids: opportunities, challenges and strategies. *Microbial Cell Factories*, 16(1), 137. <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0753-2>
- Das, A. J., y Kumar, R. (2019). Production of biosurfactant from agro-industrial waste by *Bacillus safensis* J2 and exploring its oil recovery efficiency and role in restoration of diesel contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 16, 100450.
- Daverey, A., y Pakshirajan, K. (2009). Production, characterization, and properties of sophorolipids from the yeast *Candida bombicola* using a low-cost fermentative medium. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 158(3), 663-674. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8449-z>
- De Souza Monteiro, A., Domingues, V. S., Souza, M. V. D., Lula, I., Gonçalves, D. B., de Siqueira, E. P., y dos Santos, V. L. (2012). Bioconversion of biodiesel refinery waste in the bioemulsifier by *Trichosporon mycotoxinivorans* CLA2. *Biotechnology for Biofuels*, 5(1), 29.
- Dziegielewska, E., y Adamczak, M. (2013). Evaluation of waste products in the synthesis of surfactants by yeasts. *Chemical Papers*, 67(9), 1113-1122. <https://DOI.org/10.2478/s11696-013-0349-1>
- Fakruddin, M. (2012). Biosurfactant: production and application. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 3(4), 1000124. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000124>
- Freitas de Oliveira, D. W., Lima França, Í. W., Nogueira Félix, A. K., Lima Martins, J. J., Aparecida Giro, M. E., Melo, V. M. M., y Gonçalves, L. R. B. (2013). Kinetic study of biosurfactant production by *Bacillus subtilis* LAMI005 grown in clarified cashew apple juice. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 101, 34-43. <https://DOI.org/10.1016/j.colsurfb.2012.06.011>
- Gaur, V. K., Sharma, P., Sirohi, R., Varjani, S., Taherzadeh, M. J., Chang, J.-S., Yong Ng, H., Wong, J. W. C., y Kim, S.-H. (2022). Production of biosurfactants from agro-industrial waste and waste cooking oil in a circular bioeconomy: An overview. *Bioresour. Technology*, 343, 126059. <https://DOI.org/10.1016/j.biortech.2021.126059>
- Gudiña, E. J., Rodrigues, A. I., Alves, E., Domingues, M. R., Teixeira, J. A., y Rodrigues, L. R. (2015). Bioconversion of agro-industrial by-products in rhamnolipids toward applications in enhanced oil recovery and bioremediation. *Bioresour. Technology*, 177, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.069>

- Gudiña, E. J., Rodrigues, A. I., de Freitas, V., Azevedo, Z., Teixeira, J. A., y Rodrigues, L. R. (2016). Valorization of agro-industrial wastes towards the production of rhamnolipids. *Bioresource Technology*, 212, 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.027>
- Hausmann, R., y Syldatk, C. (2014). Types and classification of microbial surfactants. In N. Kosaric y F. Vardar-Sukan (Eds.), *Biosurfactants: production and utilization-processes, technologies, and economics* (pp. 1). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17599>
- Henkel, M., y Hausmann, R. (2019). Diversity and classification of microbial surfactants. In D. G. Hayes, D. K. Y. Solaiman, y R. D. Ashby (Eds.), *Biobased Surfactants* (Second Edition) (pp. 41-63). AOCs Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812705-6.00002-2>
- Hošková, M., Ježdík, R., Schreiberová, O., Chudoba, J., Šír, M., Čejková, A., Masák, J., Jirků, V., y Řezanka, T. (2015). Structural and physiochemical characterization of rhamnolipids produced by *Acinetobacter calcoaceticus*, *Enterobacter asburiae* and *Pseudomonas aeruginosa* in single strain and mixed cultures. *Journal of Biotechnology*, 193, 45-51.
- Inès, M., y Dhouha, G. (2015). Lipopeptide surfactants: Production, recovery and pore forming capacity. *Peptides*, 71, 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2015.07.006>
- Jahan, R., Bodratti, A. M., Tsianou, M., y Alexandridis, P. (2020). Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 275, 102061. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102061>
- Janek, T., Łukaszewicz, M., y Krasowska, A. (2013). Identification and characterization of biosurfactants produced by the Arctic bacterium *Pseudomonas putida* BD2. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 110, 379-386. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.05.008>
- Jiménez-Peñalver, P., Rodríguez, A., Daverey, A., Font, X., y Gea, T. (2019). Use of wastes for sophorolipids production as a transition to circular economy: state of the art and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 18(3), 413-435. <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09502-3>
- Jimoh, A. A., y Lin, J. (2019). Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184, 109607. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109607>
- Johnson, P., Trybala, A., Starov, V., y Pinfield, V. J. (2021). Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 288, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102340>
- Kaczorek, E., Pacholak, A., Zdarta, A., y Smułek, W. (2018). The impact of biosurfactants on microbial cell properties leading to hydrocarbon bioavailability increase. *Colloids and Interfaces*, 2(3), 35. <https://doi.org/10.3390/colloids2030035>
- Li, J., Xia, C., Fang, X., Xue, H., y Song, X. (2016). Identification and characterization of a long-chain fatty acid transporter in the sophorolipid-producing strain *Starmerella*

- bombicola*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(16), 7137-7150. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7580-y>
- Liu, H., Wang, H., Chen, X., Liu, N., y Bao, S. (2014). Biosurfactant-producing strains in enhancing solubilization and biodegradation of petroleum hydrocarbons in groundwater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(7), 4581-4589. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3721-x>
- McClements, D. J., y Gumus, C. E. (2016). Natural emulsifiers - Biosurfactants, phospholipids, biopolymers, and colloidal particles: Molecular and physicochemical basis of functional performance. *Advances in Colloid and Interface Science*, 234, 3-26. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.03.002>
- Mnif, I., y Ghribi, D. (2015). Review lipopeptides biosurfactants: Mean classes and new insights for industrial, biomedical, and environmental applications. *Peptide Science*, 104(3), 129-147. <https://doi.org/10.1002/bip.22630>
- Morita, T., Fukuoka, T., Imura, T., y Kitamoto, D. (2015). Mannosylerythritol lipids: Production and applications. *Journal of Oleo Science*, 64(2), 133-141. <https://doi.org/10.5650/jos.ess14185>
- Mujumdar, S., Bashetti, S., Pardeshi, S., y Thombre, R. S. (2017). Industrial applications of biosurfactants. In D. Thangadurai y J. Sangeetha (Eds.). *Industrial Biotechnology* (pp. 81-109). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781315366562>
- Mujumdar, S., Joshi, P., y Karve, N. (2019). Production, characterization, and applications of bioemulsifiers (BE) and biosurfactants (BS) produced by *Acinetobacter* spp.: A review. *Journal of Basic Microbiology*, 59(3), 277-287. <https://DOI.org/https://doi.org/10.1002/jobm.201800364>
- Nitschke, M., Costa, S. G. V. A. O., y Contiero, J. (2010). Structure and applications of a rhamnolipid surfactant produced in soybean oil waste. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 160(7), 2066-2074. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8707-8>
- Oliveira, J. G. d., y Garcia-Cruz, C. H. (2013). Properties of a biosurfactant produced by *Bacillus pumilus* using vinasse and waste frying oil as alternative carbon sources. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 56. <https://DOI.org/10.1590/S1516-89132013000100020>
- Ortega-de la Rosa, N. D., Vázquez-Vázquez, J. L., Huerta-Ochoa, S., Gimeno, M., y Gutiérrez-Rojas, M. (2018). Stable bioemulsifiers are produced by *Acinetobacter bowetii* UAM25 growing in different carbon sources. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 41(6), 859-869. <https://DOI.org/10.1007/s00449-018-1920-5>
- Panilaitis, B., Castro, G. R., Solaiman, D., y Kaplan, D. L. (2007). Biosynthesis of emulsan biopolymers from agro-based feedstocks. *Journal of Applied Microbiology*, 102(2), 531-537. <https://DOI.org/10.1111/j.1365-2672.2006.03078.x>

- Paulino, B. N., Pessôa, M. G., Molina, G., Kaupert Neto, A. A., Oliveira, J. V. C., Mano, M. C. R., y Pastore, G. M. (2017). Biotechnological production of value-added compounds by ustilaginomycetous yeasts. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(21), 7789-7809. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8516-x>
- Pedraza-Segura, L., Rodríguez-Durán, L. V., Saucedo-Castañeda, G., y de Jesús Cázares-Marinero, J. (2021). Application of microorganisms in biosurfactant production. In S.P. Singh y S.K. Upadhyay (Eds.), *Bioprospecting of Microorganism-Based Industrial Molecules* (pp. 6-30). <https://doi.org/10.1002/9781119717317.ch2>
- Pekin, G., Vardar-Sukan, F., y Kosaric, N. (2005). Production of sophorolipids from *Candida bombicola* ATCC 22214 using turkish corn oil and honey. *Engineering in Life Sciences*, 5(4), 357-362. <https://doi.org/10.1002/elsc.200520086>
- Pirog, T. P., y Ignatenko, S. V. (2011). Scaling of the process of biosynthesis of surfactants by *Rhodococcus erythropolis* EK-1 on hexadecane. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47(4), 393-399. <https://doi.org/10.1134/S0003683811040120>
- Rau, U., Nguyen, L. A., Roeper, H., Koch, H., y Lang, S. (2005). Fed-batch bioreactor production of mannosylerythritol lipids secreted by *Pseudozyma aphidis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 68(5), 607-613. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-1906-5>
- Rau, U., Nguyen, L. A., Schulz, S., Wray, V., Nimtz, M., Roeper, H., Koch, H., y Lang, S. (2005). Formation and analysis of mannosylerythritol lipids secreted by *Pseudozyma aphidis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 66(5), 551-559. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1672-9>
- Roelants, S., Solaiman, D. K. Y., Ashby, R. D., Lodens, S., Van Renterghem, L., y Soetaert, W. (2019). Production and applications of sophorolipids. In D. G. Hayes, D. K. Y. Solaiman, y R. D. Ashby (Eds.), *Biobased Surfactants* (Second Edition) (pp. 65-119). AOCS Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812705-6.00003-4>
- Roelants, S. L. K. W., y Soetaert, W. (2022). Industrial perspectives for (microbial) biosurfactants. In R. Hausmann y M. Henkel (Eds.), *Biosurfactants for the Biobased Economy* (pp. 1-15). Springer. https://doi.org/10.1007/10_2021_175
- Santos, D. K., Rufino, R. D., Luna, J. M., Santos, V. A., y Sarubbo, L. A. (2016). Biosurfactants: Multifunctional biomolecules of the 21st Century. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(3), 401. <https://doi.org/10.3390/ijms17030401>
- Santos, E. F., Teixeira, M. F. S., Converti, A., Porto, A. L. F., y Sarubbo, L. A. (2019). Production of a new lipoprotein biosurfactant by *Streptomyces* sp. DPUA1566 isolated from lichens collected in the Brazilian Amazon using agroindustry wastes. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 142-150. <https://DOI.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.10.014>
- Sarubbo, L. A., Silva, M. d. G. C., Durval, I. J. B., Bezerra, K. G. O., Ribeiro, B. G., Silva, I. A., Twigg, M. S., y Banat, I. M. (2022). Biosurfactants: Production, properties,

- applications, trends, and general perspectives. *Biochemical Engineering Journal*, 181, 108377. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108377>
- Smyth, T.J. P., Rudden, M., Tsaousi, K., Marchant, R., y Banat, I. M. (2016). Protocols for the detection and chemical characterisation of microbial glycolipids. In T. J. McGenity, K. N. Timmis, y B. Nogales (Eds.), *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols: Biochemical Methods* (pp. 29-60). Springer. https://doi.org/10.1007/8623_2014_25
- Takahashi, M., Morita, T., Wada, K., Hirose, N., Fukuoka, T., Imura, T., y Kitamoto, D. (2011). Production of sophorolipid glycolipid biosurfactants from sugarcane molasses using *Starmerella bombicola* NBRC 10243. *Journal of Oleo Science*, 60(5), 267-273. <https://doi.org/10.5650/jos.60.267>
- Tan, Y. N., y Li, Q. (2018). Microbial production of rhamnolipids using sugars as carbon sources. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0938-3>
- Varjani, S. J., y Upasani, V. N. (2017). Critical review on biosurfactant analysis, purification and characterization using rhamnolipid as a model biosurfactant. *Bioresource Technology*, 232, 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.047>
- Verma, C., Hussain, C. M., Quraishi, M. A., y Alfantazi, A. (2023). Green surfactants for corrosion control: Design, performance and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 311, 102822. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102822>.
- Verma, R., Sharma, S., Kundu, L. M., y Pandey, L. M. (2020). Experimental investigation of molasses as a sole nutrient for the production of an alternative metabolite biosurfactant. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101632. <https://DOI.org/10.1016/j.jwpe.2020.101632>
- Yang, X., Zhu, L., Xue, C., Chen, Y., Qu, L., y Lu, W. (2012). Recovery of purified lactonic sophorolipids by spontaneous crystallization during the fermentation of sugarcane molasses with *Candida albicans* O-13-1. *Enzyme and Microbial Technology*, 51(6), 348-353. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2012.08.002>

Capítulo 11

Reducción de cafeína en ensilados de pulpa/cáscara de café para la alimentación de rumiantes *Caffeine reduction in coffee pulp/skin silage for ruminant feeding*

¹Victor Jesús Albores Flores

¹José Alfonso López García

¹Julieta Grajales Conesa

²Hermilo Lucio Castillo¹

Resumen

La búsqueda de alternativas alimentarias empleadas como forrajes para la nutrición de rumiantes que proporcionen suficientes azúcares, proteína, una cantidad equilibrada de aminoácidos, una buena fuente de vitaminas y grasas es complicada. Recientemente, se ha evaluado ensilar residuos agroindustriales como la cáscara, pulpa y semilla de café para reducir la presencia o concentración de sustancias tóxicas para los animales. En este estudio se determinó el contenido de cafeína del residuo del beneficio húmedo de café de la Finca Monte Perla, localizada en el municipio de Unión Juárez, Chiapas, México, sometido a ensilaje con adición de melaza como aditivo, ya que la melaza mejora el valor nutricional por ser una buena fuente de carbohidratos. Los residuos (cáscara/pulpa) fueron puestos en silos a pequeña escala, se realizaron tomas de muestra de los ensilajes de los tres tratamientos con tres diferentes tiempos cada uno. Se analizó y cuantificó el contenido de cafeína por HPLC-DAD, de los cuales se encontró una reducción del 70 % en cafeína en todos los tratamientos donde se adicionó melaza, comparados con el testigo. Los parámetros obtenidos de los análisis fisicoquímicos (pH, carbohidratos solubles y ácido láctico) demuestran que se llevó a cabo una fermentación por ensilaje

¹ Universidad Autónoma de Chiapas. Instituto de Biociencias. Campus IV Blvd. Príncipe Akishino s/n Col. Solidaridad 2000, Tapachula, Chiapas, México, C.P. 30790

² Universidad Autónoma de Tamaulipas; Unidad académica multidisciplinaria Mante, Blvd. Enrique Cárdenas González, #1202 PTE, Col. Jardín, CP. 89840, Cd. Mante Tamaulipas.

*Autor de correspondencia: victor.albores@unach.mx

adecuada, a velocidades no menores del $39.00 \text{ uAx}10^6$, indicando que sin melaza la fermentación por ensilado no tiene un valor de pH viable.

Palabras clave: alimentación animal, ensilar, residuo agroindustrial, café.

Summary

The search for alternatives, such as food sources used as forages for ruminant nutrition, that provide sufficient sugars, protein, a balanced amount of amino acids, a good source of vitamins and fats, is complicated. Recently, ensiling agro-industrial residues such as peel, pulp and brown seed has been evaluated to reduce the presence or concentration of toxic substances for animals. In this study, the caffeine content of the residue from the wet coffee mill of the Monte Perla Farm located in the municipality of Unión Juárez, Chiapas, Mexico, subjected to silage with the addition of molasses as an additive, was determined, since molasses improves the value of coffee. nutritional value and ensures good silage, as it is a good source of carbohydrates. The residues (peel/pulp) were placed in silos on a small scale. Samples were taken from the silages of the three treatments with three different times each. Caffeine content was analyzed and quantified by HPLC-DAD, of which a 70% reduction in caffeine was found in all treatments where molasses was added compared to the control. The parameters obtained from the physicochemical analyzes (pH, soluble carbohydrates and lactic acid) show that an adequate silage fermentation was carried out, at speeds not less than $39.00 \text{ uAx}10^6$, indicating that without molasses silage fermentation does not have a pH value viable.

Keywords: animal feed, silage, agro-industrial residue, coffee.

Introducción

La búsqueda de nuevas alternativas de solución para sufragar los nutrimentos esenciales o básicos en la cría de animales, utilizados en la producción de carne, son una necesidad creciente en este siglo. En los animales rumiantes, normalmente criados en sistemas de pastoreo extensivo, el nivel de suplementación de nutrimentos necesarios es nulo o escaso y se alterna su cría, según sea la estacionalidad de producción de forraje (Posada-Ochoa et al., 2016). En la producción de ganado, las deficiencias ocurren en el manejo y bienestar de los animales, provocando cambios en su comportamiento. El transporte, agotamiento por privación de agua y la falta de nutrimentos esenciales en la comida ingerida afectan la estabilidad y comportamiento de estos animales (Irreño-Barrera et al., 2022) provocando un estrés que reduce la calidad y cantidad de carne producida. Además, el valor económico y las alternativas de producción de los productos alimentarios que fungan como fuentes principales o participan como componentes de formulados

alimenticios en la nutrición del ganado, son otro factor que influye en la producción de estos animales (Rubio-Lozano et al., 2015).

La siembra de pastos, implementación de riego, inclusión de cultivos forrajeros e hidroponía, constituyen alternativas viables para la producción de ganado. A esto se añade la búsqueda de alternativas que mejoren la digestibilidad, con variables como el aporte de nutrientes del pasto, la fertilidad del suelo que los sostiene, la cantidad de biomasa producida para sostener la alimentación y su propia calidad (Rubio-Lozano et al., 2015). Resulta complicado buscar una fuente alimenticia alternativa que apoye el uso de forrajes como alimentos viables, que proporcione suficientes azúcares y proteínas, que contenga una cantidad equilibrada de aminoácidos y que constituya una buena fuente de vitaminas y grasas. En la última década, la fermentación sólida se ha aplicado para conservar excedentes en los productos alimenticios que se ofrecen a los animales (López-García et al., 2021). Además, permite la conservación del valor nutritivo, la palatabilidad de las fuentes vegetales utilizadas mejora la digestibilidad de estas y aumenta la aceptabilidad en el ganado (Peláez et al., 2008). Entre las fermentaciones sólidas existentes, se encuentra la acética, la alcohólica, la butírica y la láctica, siendo esta última para ensilados de forraje (Borrás-Sandoval y Torres-Vidales, 2016).

Los forrajes son la base primordial de la dieta de rumiantes, por mantener la capacidad e integridad del desarrollo de los microorganismos del rumen. En todo sistema de producción de ganado, tanto tropical como no tropical, la producción de forrajes como fuente alternativa durante los periodos de escasez es una prioridad cuando se busca tener una fuente de disponibilidad de biomasa alimenticia. En la última década, se han utilizado ensilajes mixtos, donde se incluyen gramíneas, pulpa y cáscara seca de frutas, que son fuentes ricas en energía para dieta de ganado y un medio alternativo respecto de los componentes de una dieta convencional (Morales-Querol et al., 2022).

Entre las alternativas de componentes para dietas de ensilaje mixtos, el residuo de cáscara de pulpa de café, debido a su gran volumen y la frecuencia de disponibilidad por las temporadas de cosecha de este cultivo, al año, es un aspirante como sustituto de fuente rica de energía para dieta de ganado (Hatningsih et al., 2018). Esta fuente alternativa, a pesar de contener una cáscara fibrosa y ocupar el 40% del peso total de grano de café, ha sido utilizado como ingrediente en la elaboración de mezclas balanceadas para alimentar tilapias y cerdos, utilizando el 10 y 15 %, respectivamente, de este producto (Flórez-Delgado y Rosales-Asensio, 2018).

La cafeína es una molécula considerada como componente vegetal, contenida en granos de cacao, hojas de té, nueces y café. Por ser un alcaloide, la cafeína actúa como droga y en los animales tiene efectos psicológicos y puede

causar un aumento en la actividad motora. Lo anterior provoca un aumento en el uso de energía que produce pérdida de peso, afectando la eficiencia de conversión (Faber et al., 2018; Noriega et al., 2008). La cafeína afecta el sistema nervioso de los animales, puede provocar depresión, en ocasiones restablece su rendimiento sin aumento, provoca sed excesiva y evacuación constante, lo que resulta en pérdida de nitrógeno y en cantidades altas reduce el apetito y provoca un efecto diurético (Aguilera et al., 2009; Faber et al., 2018). Por ello es importante reducir su concentración en silos, evitando efectos negativos en el desarrollo de los animales.

Para la eliminación de cafeína de los residuos agroindustriales, se han empleado microorganismos como agentes de bio-conversión o bio-transformación de este tipo de moléculas, a nivel *in vitro* han dado resultados de una reducción máxima del 66 % de este alcaloide (Ibrahim et al., 2016). Se ha reportado que, en fermentaciones aeróbicas y anaeróbicas, la reducción de este alcaloide, incluyendo compuestos taninos, puede durar horas cuando los procesos son constantes, a temperatura controlada (Altop et al., 2018). Durante los procesos de fermentación de ensilaje de pulpa de café, se reportó que el desarrollo de la microbiota bacteriana anaeróbica, además de generar ácido láctico y reducir los valores de pH del proceso, redujo el 50% del contenido de cafeína en un tiempo de 16 h de incubación en el proceso de transformación, observando la inhibición de otros microorganismos, considerados como patógenos en el proceso (Hatiningsih et al., 2018). Por lo anterior, el proceso de ensilaje es una alternativa para reducir la cantidad de sustancias anti nutricionales como la cafeína, logrando con ello la inclusión de este tipo de sustratos en la alimentación de animales (Munguía-Ameca, 2015).

Estudios recientes reportan una reducción del 0.72 % en el contenido de cafeína, al mantener el proceso de ensilaje por 60 días, en otros reportes se ha logrado una reducción del 11.7 % en la concentración de cafeína en la pulpa procesada (Flórez-Delgado y Rosales-Asensio, 2018). Existen estudios desalentadores que indican que en la fermentación de ensilaje no hay cambios en la concentración de cafeína en la pulpa procesada, y que, además, se aumenta la concentración de compuestos fenólicos. Otros investigadores hacen hincapié en que el problema puede estar en el tipo de cepa microbiana utilizada (Flórez-Delgado y Rosales-Asensio, 2018). El objetivo del presente trabajo fue evaluar el proceso de ensilaje en la disminución de un 75-85 % del contenido de cafeína presente en los residuos cáscara/pulpa del beneficio húmedo de café.

Materiales y métodos

Se obtuvo el residuo del beneficio húmedo de café de la Finca Monte Perla (15°02' 37'' N 92°05' 21'' W) en el municipio de Unión Juárez, Chiapas, México. El residuo se obtuvo de acuerdo con la *Norma ISO-10725: Planes y procedimientos de muestreo de aceptación para la inspección de materiales a granel* (2009). El material elemental base de 1 kg de residuo (cáscara-pulpa) de cada tratamiento se homogenizó con melaza, después de ello se colocó por capas (incluyendo los testigos) (Wagner et al., 2011). Se dejó en una bodega sin exposición a luz solar y a temperatura de 32 ± 4 con tres tiempos de almacenamiento hasta alcanzar 180 días. Se respetó la relación cáscara-pulpa que los productores de silos utilizan, para alimentar a sus animales, siendo este valor de 70 % de pulpa y 30 % de cáscara, y la reducción de humedad, con valor de 90 %, y reduciéndola a un 60 %. Se siguió un diseño de bloques al azar, que consistió en evaluar 3 tratamientos y un testigo, considerando 1 kg por tratamiento, y 4 tiempos, incluyendo el día 0: T) Testigo (cáscara - pulpa), T1) Tratamiento 1 (cáscara - pulpa + 100 g de melaza), T2) Tratamiento 2 (cáscara - pulpa + 200 g de melaza), T3) Tratamiento 3 (cáscara - pulpa + 300 g de melaza). Tiempos: D 0) Día 0, D1) Día 60, D2) Día 120 y D3) Día 180. Todos los tratamientos se realizaron por triplicado.

Después de efectuar los ensilajes en sus respectivos tiempos (Día 0, Día 60, Día 120 y Día 180) y con los tratamientos establecidos, se pesaron 200 g de cada silo. Se determinó el contenido de ácido láctico mediante la norma NMX-F-420-1982. La determinación de pH se realizó mediante el método electrométrico. El contenido de carbohidratos solubles fue determinado, según Vila-López (2006), con un medidor de °Brix.

Las muestras fueron descongeladas en ultracongelador (congelación en tiempo rápido de menos de 4 horas a temperatura muy baja, a -18°C o más) recién fueron colectadas y descongeladas hasta el momento de su utilización, de acuerdo con el método CAC/RCP 8 (1976). Se realizó un proceso de extracción líquido/líquido de cafeína de las muestras en di-cloro-metano. Para analizar y cuantificar cafeína en las muestras, se utilizó cromatografía líquida de alta eficiencia con detector de arreglo de diodos (HPLC-DAD) (Sanabria et al., 2017) con algunas modificaciones. La separación fue llevada a cabo con un equipo Agilent 1260 con detector DAD y bomba cuaternaria, la columna usada fue una Kromasil C18, de 4.5 x 250 mm de longitud de onda por 5 μm de tamaño de partícula, detección DAD y una fase móvil compuesta por agua / acetonitrilo al 50% en régimen isocrático. Se realizó un análisis ANOVA univariado y un análisis multivariado de la varianza (MANOVA). Se identificaron las concentraciones de cafeína mediante el espectro obtenido por cromatografía líquida de alta eficiencia con detector de

arreglo de diodos (HPLC-DAD) mediante el tiempo de retención. Para determinar la velocidad de reducción de cafeína en cada uno de los procesos de ensilaje, se determinó el valor de R^2 y la pendiente lineal. Posterior a los datos obtenidos del contenido de cafeína y de los análisis químicos, se contraponieron matrices para determinar la relación existente entre ellas. Se realizó un Análisis Discriminante Lineal (ADL) y un análisis de componentes principales acompañado de una correlación parcial para determinar las variables influyentes.

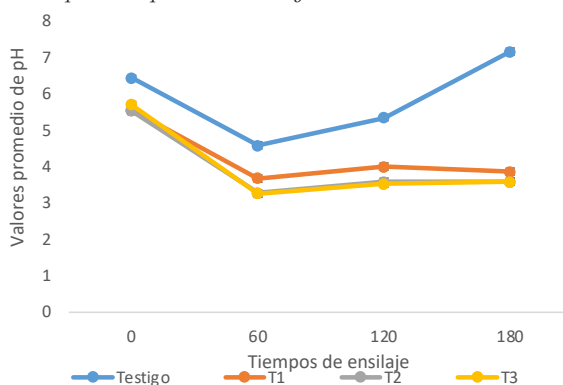
Resultados y discusión

El pH, contenido de azúcares disueltos y el contenido de ácido láctico mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.0001$). La comparación de medias mostró que los tratamientos T2 y T3 fueron similares en la dinámica de valor de pH durante todo el estudio. El ensilaje de forrajes verdes y otros materiales, como pulpa y cáscara de frutas secas o húmedas, bajo condiciones anaeróbicas permiten el desarrollo de un proceso fermentativo por el consumo de carbohidratos, produciendo la síntesis de ácidos orgánicos y reduciendo el valor de pH (Perraud-Gaime et al., 2021).

En el presente trabajo, todos los tratamientos donde se adicionó melaza redujeron su valor de pH en el día 60 y se mantuvo oscilando en cada uno de ellos en valores de (3.5 -4.2) por los siguientes 120 días restantes, en que se evaluó el ensilado. Acorde con Perraud-Gaime et al. (2021) y Encalada et al. (2017), los valores estables de pH en el proceso de ensilaje de pulpa de café con melaza, fue de calidad, produciendo como resultado una buena cantidad de ácidos orgánicos (Figura 1).

Figura 1

Dinámica de los cambios de pH en el proceso de ensilaje



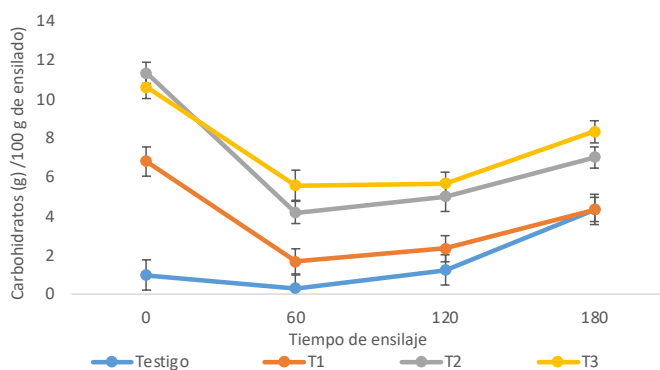
Fuente: elaboración propia.

En el tratamiento testigo se presentó una elevación del valor de pH posterior al día 60 (Figura 1), debido a una fermentación sin una buena acidificación (Guzmán et al., 2012). Los valores observados de pH y su dinámica en el proceso de ensilaje de la pulpa de café, con adición de melaza, se traduce en que existió un desarrollo estable de bacterias ácido lácticas que mantuvieron viable el proceso de fermentación, evitando el desarrollo de contaminantes microbianos que compitieran con los nutrientes presentes, similar a lo reportado por Kraut-Cohen et al. (2016). Los subproductos generados en un proceso de fermentación láctica donde existió presencia microbiana, como bacterias ácido lácticas, según García et al. (2010), se da la generación de productos alternos derivados del proceso de fermentación láctica donde hubo consumo de fuente carbonada, formándose productos nitrogenados, azúcares de bajo peso molecular entre otros metabolitos, que también aportan a que exista una reducción en el valor de pH y pueden ser enmascarados por el producto mayoritario.

Los valores de azúcares encontrados después del día 60 del proceso de fermentación láctica del ensilaje de pulpa de café, corresponden a los subproductos de la fermentación láctica que estuvieron solubles en la fase líquida formada en la base de materia prima (Figura 2). Guzmán et al. (2012) mencionan que los aditivos deben poseer alta cantidad de carbohidratos fermentables, y que estos, según Perraud-Gaime et al. (2021), son la fuente energética para la biosíntesis de ácido láctico por medio del uso de bacterias ácido lácticas, descendiendo los valores de pH.

Figura 2

Dinámica de producción de carbohidratos solubles en el proceso de ensilaje



Fuente: elaboración propia.

En este estudio, los valores de azúcares solubles aumentan después del día 60 (Figura 2), hasta el día 180, y se proponen dos posibles explicaciones:

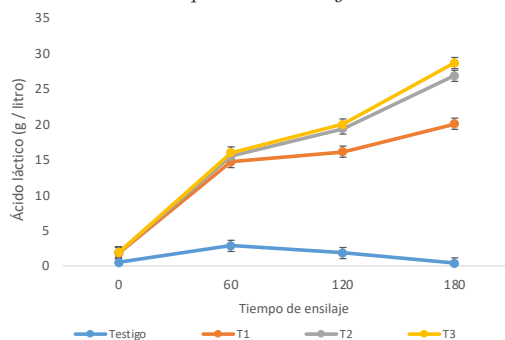
Primero: los valores de azúcares solubles en este proceso de ensilaje se atribuyen a la presencia de sólidos solubles totales que estuvieron constituidos por azúcares, sales, ácidos y otros metabolitos sintetizados en el metabolismo de los microorganismos (Minoshka, 2016), que forman parte del complejo sólido-líquido del ensilaje.

Segundo: que la pulpa de café está compuesta de azúcares reductores y no reductores, sustancias pécticas, fibras, hemicelulosa, celulosa, lignina entre otros, y estas moléculas son polisacáridos, considerados bioquímicamente como fuentes energéticas alternas de glucosa (Fierro et al., 2018), que durante el proceso de ensilaje debido a la producción enzimática y la acidez del ambiente del proceso de fermentación, se fueron degradando del tejido vegetal (pulpa), solubilizándose cada una de ellas en la fase acuosa del proceso, dando como resultado en la evaluación de °Brix (Figura 2), valores en aumento (Serrat-Díaz et al., 2016).

En la cantidad de ácido láctico encontrado en las evaluaciones realizadas al proceso de ensilaje, correspondiente por cada tratamiento, se puede traducir lo siguiente: en el tratamiento testigo, la cantidad de ácido láctico producido debía estar relacionado a la cantidad de azúcar consumido (Figura 2 y 3), y acorde con Vélez et al. (2017), por cada molécula de sacarosa se producen 4 moléculas de ácido láctico. El decremento en la concentración de ácido láctico presentado en el tratamiento testigo, el cual no tuvo una fuente alterna de carbohidratos (sacarosa), fue producto de la generación de biomasa microbiana y una reconversión de ácido láctico a piruvato, explicando que la carga energética se enfocó a la producción de metabolitos primarios y división celular (Figura 3).

Figura 3

Dinámica de producción de ácido láctico en el proceso de ensilaje



Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, y relacionando el valor de pH, es probable que en el proceso de ensilaje existió la presencia de algún contaminante o alta competencia de otros microorganismos que estuvieron presentes (Kraut-Cohen et al., 2016), lo que aumentó el valor de pH, ideal en el proceso de ensilaje.

En los tratamientos donde se adicionó melaza, es relativa la cantidad de ácido láctico producido con la cantidad de azúcares solubles obtenidos, en los primeros 60 días del proceso de ensilaje (Figura 3), y después del día 120 ambos valores van en aumento. Lo anterior es el resultado de la degradación de sustancias pécticas, fibra, hemicelulosa, celulosa entre otros, por las enzimas excretadas por los microorganismos ácido lácticos que se desarrollaron en el proceso de ensilaje de pulpa de café con melaza (Serrat-Díaz et al., 2016), que mantuvieron constantemente la disponibilidad de fuentes energéticas para la elaboración de ácido láctico. Este crecimiento exitoso y la producción de ácido láctico, fue también aporte de una regulada constante de acidez que no permitió el desarrollo de microorganismos contaminantes o competidores, observada en el valor de pH. La producción de este ácido orgánico en el proceso de ensilaje de pulpa de café con melaza, muestra, según Perraud-Gaime et al. (2021), que el producto obtenido se encontró dentro de sus criterios para ser considerado aceptable, y para que las condiciones del proceso de producción se dirijan a una fermentación láctica adecuada, es necesario agregar melaza.

La pulpa de café se ha empleado para alimentación de bovinos, aunque la cantidad adicionada depende del tipo de animal y no puede llegar a excederse de un 30% del total de las dietas del rumiante, pues se ha reportado que las sustancias que han provocado daño son los taninos (1.68 %) y específicamente altas concentraciones de cafeína y ácido clorogénico (Pinto-Ruíz et al., 2017; Encalada et al., 2017). En el presente estudio, se buscó reducir la concentración de cafeína en la pulpa por medio de un proceso de ensilaje, adicionado con melaza y lograr introducirlo a la dieta de rumiantes. Según Encalada et al. (2017) y Flores-Delgado y Rosales-Asencio (2018), con el proceso de ensilaje, se busca mejorar la palatabilidad del animal, mejorando la producción de carne y sostén nutricional de estos, sin considerar la reducción en la concentración de cafeína.

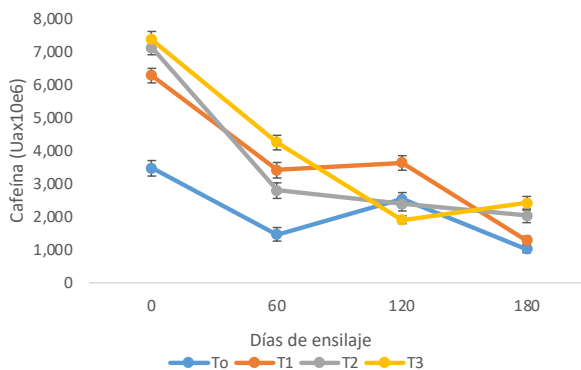
En este estudio, se obtuvo un mayor porcentaje en la reducción de cafeína (Figura 4) cuando se adicionó melaza al proceso de ensilaje, alcanzando valores de reducción, en un mínimo de 71.46 % y un máximo de 79.58 %, en 180 días de fermentación a valores óptimos de pH con una producción sustancial de ácido láctico. Acorde con Munguía-Ameca (2015), cuando se usó ensilado de pulpa de café, la cantidad de cafeína detectada en el producto consumido por rumiantes fue de 1.32 microgramos / 100 gr de dieta, que fue adicionada con 20 % de ensilado de

pulpa de café (a valores de pH de 3.9 a 4.5), sin provocar síntomas en los animales, alcanzando un aumento de peso de 10 kg en 60 días sin diferencias con los animales que no recibieron ensilado de pulpa de café. Por lo anterior, los presentes resultados aportan información enriquecedora para manejar como alternativa al producto obtenido del ensilado de pulpa de café, adicionado con melaza, con un tiempo de fermentación de 180 días para posible alimentación de rumiantes.

El producto obtenido en el proceso de ensilaje podría estar en los parámetros aceptables, según Pinto-Ruíz et al. (2017), porque estos resultados concuerdan con ellos, indicando que a mayor tiempo de ensilaje mayor será la reducción de cafeína a obtener, mejor será la regulación de pH, el sustrato para los silos es importante para también alcanzar a mejorar la textura del producto. El proceso estuvo regulado por la cantidad de azúcares y ácido láctico producido, lo que permitió mayor reducción en la concentración de cafeína (Figura 4).

Figura 4

Dinámica de reducción en la concentración de cafeína durante el proceso de ensilaje



Fuente: elaboración propia.

A pesar de que la concentración de cafeína final fue menor en el tratamiento testigo, no significa que sea el mejor tratamiento en reducción de la concentración de cafeína, donde el valor en porcentaje de reducción fue de 70.42 %. Al realizar una comparación analógica, las unidades determinadas en los tratamientos que recibieron la adición de melaza tuvieron el doble de unidades de cafeína del valor encontrado en el tratamiento testigo. Lo anterior representa relativamente que el valor encontrado en el tratamiento testigo es la mitad de lo suscitado en los tratamientos adicionados con melaza.

Para el crecimiento microbiano, generado por los microorganismos que se desarrollan en el silo, necesitan por prioridad una fuente energética para estimular su crecimiento y posteriormente centrarse en la degradación de moléculas alternativas como fuente de energía, lo que facilita su asimilación dentro de la membrana y su metabolismo en los procesos de degradación o transformación metabólica (Garcés et al., 2004; Puerta Quintero, 2012). Lo anterior explicaría el comportamiento de la rápida reducción de la concentración de cafeína en los tratamientos en los que se adicionó melaza y también en el testigo, ya que, según Flórez-Delgado y Rosales-Asensio (2018), la pulpa de café contiene un porcentaje de azúcar, lo que estimula el crecimiento microbiano antes de efectuar la asimilación de cafeína y su metabolización.

Conclusiones

En el proceso de fermentación láctica elaborado en el ensilaje de pulpa de café, la adición de melaza, independientemente de la concentración, determinó una regulación apropiada de pH, consumo de azúcares solubles, generación de ácido láctico y una reducción exitosa de cafeína. El tiempo de fermentación apropiado para alcanzar valores de reducción de cafeína de 70 y 80 % en el proceso de ensilado de la pulpa de café, fue de 120 días, donde la relación entre el valor de pH y cafeína es inversamente proporcional. La adición de melaza al proceso de ensilaje mejoró la velocidad de reducción de cafeína. La falta de melaza en un proceso de ensilaje por fermentación láctica conducirá un desbalance en el valor de pH.

Referencias

- Aguilera, V., López-Espinoza, A., Gabriela, M. A., Díaz, F., Valdez, E., y de la Torre, I. A. G. (2009). Efecto del consumo de café sobre la conducta alimentaria en ratas. *Diversitas: Perspectivas en Psicología*, 5, 177-185.
- Altop, A., Coskun, I., Filik, G., Kucukgul, A., Bekiroglu, Y. G., Cayan, H. y Erener, G. (2018). Aminoacid, mineral, condensed tannin, and other chemical contents of olive leaves (*Olea europaea* L.) processed via solid-state fermentation using selected *Aspergillus niger* strains. *Ciencia e Investigación Agraria*, 45, 220-230. <https://doi.org/10.7764/rcia.v45i3.1886>
- Borrás-Sandoval, L. M., y Torres-Vidales, G. (2016). Producción de alimentos para animales a través de fermentación en estado sólido - FES. *ORINOQUIA*, 20(2), 47-54.
- Encalada, C. M., Fernández G. P., Jumbo B. N., y Quichimbo, A. (2017). Ensilaje de pulpa de café con la aplicación de aditivos en el cantón Loja. *Bosques Latitud Cero*, 7(2), 71-82. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/322>

- Estrada, N. C. (2010). NOM-251: Oportunidades y retos para la industria alimentaria. En *Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios* (1ra ed.), Secretaría de Salud.
- Faber, M. J., Restrepo, de M. F., Rodríguez, S. L., Fernando, G. J., y Paola, L. Y. (2018). Cafeína y comportamiento animal. Análisis sobre condiciones experimentales. *Archivos en Medicina*, 18, 152-176.
- Fierro, N., Contreras, A., González, O., Rosas, E. y Morales, V. (2018). Caracterización química y nutrimental de la pulpa del café (*Coffea arabica* L.). *Revista Agroproductividad*, 11(4), 9-13. [rticle/view/261](https://doi.org/10.21897/rta.v15i2.676)
- Flórez-Delgado, D. F. y Rosales-Asensio E. (2018). Uso del ensilaje de pulpa de café en alimentación animal. *Mundo FESC*, 15, 73-82.
- García, C. A., Arrazola, G. S., y Durango, A. M. (2010). Producción de ácido láctico por vía biotecnológica. *Temas Agrarios*, 15(2), 9-26. <https://doi.org/10.21897/rta.v15i2.676>
- Garcés Molina, A. M., Berrio Roa, L., Ruíz Alzate, S., Serna de León, J. G., y Buuiles Arango, A. F. (2004). Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. *Revista Lasallista de Investigación*, 1, 66-71.
- Guzmán, O., Lemus, C., Bugarín, J., y Bonilla, J. (2010). Ensilado de residuos de mango (*Mangifera indica* L.) para la alimentación animal. Características fermentativas. *Revista Computadorizada de Producción Porcina*, 17(3), 218-224.
- Hatiningsih, S., Antara, N. S. y Gunam, I. B.W. (2018). Microbiological And Physicochemical Changes Of Green Coffee (*Coffea arabica*) Fermentation In *Kintamani, Bangli, Bali. Media Ilmiah Teknologi Pangan (Scientific Journal of Food Technology)*, 5, 123-138. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/pangan/article/view/51477>
- Ibrahim, S., Shukor, M. Y., Syed, M. A., Johari, W. L., Shamaan, N. A., Sabullah, M. K. y Ahmad, S. A. (2016). Enhanced caffeine degradation by immobilised cells of *Leifsonia* sp. strain SIU. *The Journal of General And Applied Microbiology*, 62, 18-24. [https://doi:10.2323/jgam.62.18](https://doi.org/10.2323/jgam.62.18)
- Norma ISO-10725:2000. *Planes y Procedimientos de muestreo de aceptación para la inspección de productos a granel*.
- Kraut-Cohen, J., Tripathi, V., Chen, Y., Gatica, J., Volchinski, V., Sela, S., Weinberg, Z. y Cytryn, E. (2016). Temporal and spatial assessment of microbial communities in commercial silages from bunker silos. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100, 6827-6835. [https://doi:10.1007/s00253-016-7512-x](https://doi.org/10.1007/s00253-016-7512-x).
- López-García, J. A., Grajales-Conesa, J., Albores-Flores, V. J., Torres de los Santos, R., Ramón-Javier, L. A., y Cordova-Albores, L. C. (2021). Inclusion of *Anastrepha ludens* fruit fly pupae in poultry rations added with digestive enzymes and yeast. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 39(1), e223903. <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/37387>

- Minoshka, I. (2016). *Análisis fisicoquímico para la determinación de la calidad de las frutas*. Tesis, Ciencias exactas y naturales. Universidad Católica del Ecuador.
- Morales-Querol, D., Rodríguez-Hernández, R., López-Vigo, O., Ojeda-García, F., Camejo-Rodríguez, D., García-Sánchez, F., y Fundora-Fernández, L. (2022). Evaluación química y organoléptica de ensilajes de *Sorghum bicolor* (L.) Moench y pulpa de *Citrus* sp. *Pastos y Forrajes*, 45, e17. Epub 19 de septiembre de 2022. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942022000100017&lng=es&tlng=es.
- Munguía-Ameca, G. (2015). *Comportamiento productivo y características de la canal en ovinos alimentados con pulpa de café* (Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. México).
- NOM-F-42O-S-1982, *Norma Oficial Mexicana, productos alimenticios para uso humano - Determinación de acidez en leche fluida.* .
- Noriega Salazar, A., Silva Acuña, R., y García de Salcedo, M. (2008). Revisión: Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal. *Zootecnia Tropical*, 26(4), 411-419. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000400001&lng=es&tlng=es.
- Peláez, A., A., Meneses, M. M., Miranda Romero, L. A., Megías Rivas, M. D., Barcenas Gama, R. y Loera, O. (2008). Ventajas de la fermentación sólida con *Pleurotus sapidus* en ensilajes de caña de azúcar. *Archivos de Zootecnia*, 57(217), 25-33. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49521703>.
- Perraud-Gaime, I., Jean-Philippe, C., Carboué, Q., Aranda-Delgado, E., y Saucedo-Castañeda, G. (2021). Evolution of Physico-Chemical and Microbiological Parameters During Large-Scale Coffee-Pulp Silage. *Waste Biomass Valor* 12, 6057-6065. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01456-4>
- Pinto-Ruiz, R., Guevara-Hernández, F., Medina, J.A. Hernández-Sánchez, D., Ley-de Coss, A., y Guerra-Medina, E. (2017). Conducta ingestiva y preferencia bovina por el ensilaje de *Pennisetum* y pulpa de café. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 59-67. doi.org/10.15517/am.v28i1.23120.
- Posada-Ochoa, S., Escobar Restrepo, C., y Rosero Nogera, R. (2016). Problemática nutricional en la ganadería de carne. En *Mezclas minerales múltiples para la alimentación de Bovinos: aplicación y formulación*. Editores: Posada Ochoa, S. L., Escobar Restrepo, C.S., Rosero Nogera, R. 1ª. Edición, Fondo Editorial, Biogenesis. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Puerta, Q. (2012). Factores, procesos y controles en la fermentación del café. *Avances Técnicos Cenicafe*, 422, 1-12.
- Rubio-Lozano, M. S., Méndez-Medina, R., Reyes-Mayorga, K., Rubio-García, M., Ovando, M. Ngapo, T. y Galindo-Maldonado, F. (2015). Effect of an allostatic modulator on stress blood indicators and meat quality of commercial young bulls

- in Mexico. *Meat Science*, 105, 63-67. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.03.012. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.03.012>.
- Sanabria, L. M., Martínez, J. A. y Baena, Y. (2017). Validación de una metodología analítica por HPLC-DAD para la cuantificación de cafeína en un ensayo de permeación *in vitro* empleando mucosa oral porcina. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 46, 202-219. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v46n2.67956>
- Serrat-Díaz, M., Ussemane Mussagy, C., Camacho Pozo, M. I., Méndez Hernández, A. A. y Catalina Bermúdez, R. (2016). Valorización de residuos agroindustriales ricos en pectinas por fermentación. *Tecnología Química*, 35, <https://redalyc.org/journal/4455/445543786002/html/>
- Vélez, J. L., Montalvo, M., Velarde, G., Vélez, P., Jara, E., y Paredes, J. (2017). Fisiología, bioquímica y metabolismo del ácido láctico: revisión de la literatura. *Revista Metro Ciencia*, 25(2), 27-31. <https://revistametrociencia.com.ec/index.php/revista/article/view/26>
- Vila-López, M. R. (2006). *Caracterización fisicoquímica del membrillo japonés (Chaenomeles sp. Lindl.). Desarrollo fisiológico y conservación frigorífica* (Tesis de doctorado). Universidad de Murcia, Facultad de Veterinaria. Murcia, España. <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/206>.
- Wagner, B., Asencio, V., y Caridad, J. S. D. (2011). *Como preparar un buen ensilaje*. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Santo Domingo, República Dominicana. <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/como-preparar-buen-ensilaje-t30444.htm>.

Bioproductos a partir de residuos agroindustriales de
Guadalupe Bustos Vázquez y Daniel Trujillo Ramírez coordinadores,
publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y
Editorial Fontamara en junio de 2024. La revisión y diseño editorial
correspondieron al Consejo de Publicaciones UAT.

La actividad agroindustrial es de gran importancia para la economía de un país por sus repercusiones en el sector agropecuario y en la actividad industrial. El desarrollo y fortalecimiento de las empresas agroindustriales depende de factores legales, administrativos, de mercado, técnicos, financieros y del soporte que, a través del Estado y sector privado, pueda tener la actividad, particularmente en la generación de materia prima que satisfaga los requisitos de cantidad y calidad.

El uso de los residuos que se generan en la agroindustria representa una alternativa viable para la obtención de nuevos productos con alto valor agregado. Estos residuos provenientes de los diferentes procesos industriales (alimentarios o agrícolas) generalmente ya no son de gran interés para el empresario o productor por lo que son considerados como desechos sin otra utilidad lo que ocasiona un impacto negativo generando diversos problemas medioambientales. Sin embargo, éstos pueden ser materia prima con gran potencial para desarrollar productos biotecnológicos. La obtención de estos compuestos revalorizaría así una fracción de desecho, y originaría compuestos útiles en el campo alimentario, médico, o en el sector químico.

A través de biotecnología se utilizan microorganismos para la bioconversión de estos residuos en productos de interés comercial. Además del interés económico que ello supone para la producción de productos de mayor valor añadido (enzimas, proteína unicelular, pigmentos, antibióticos, etc.). La utilización de subproductos agroindustriales tiene incidencias en la preservación de la calidad del medio ambiente al considerar el desarrollo de tecnologías orientadas hacia una transformación sustentable de los recursos naturales.

ISBN UAT: 978-607-8888-36-8
ISBN Fontamara: 978-607-736-889-2

ISBN 978-607-736-889-2

