



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA, VALOR NUTRACÉUTICO Y APROVECHAMIENTO FERMENTATIVO DE FRUTOS DE *Parathesis psychotrioides*

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

GUILLERMO ANDRÉS PARRADO CASTRO

Bajo la supervisión de: DIANA GUERRA RAMÍREZ, DRA.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025

CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA, VALOR NUTRACÉUTICO Y
APROVECHAMIENTO FERMENTATIVO DE FRUTOS DE *Parathesis*
psychotrioides

Tesis realizada por **Guillermo Andrés Parrado Castro** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR:



DRA. DIANA GUERRA RAMÍREZ

ASESOR:



DRA. GUILLERMINA HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

ASESOR:



DRA. DIANA BECERRA MORALES

ASESOR:



DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DATOS BIOGRÁFICOS	iv
RESUMEN GENERAL	v
GENERAL ABSTRACT	vi
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Literatura citada	5
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA	8
2.1 Frutas silvestres y subutilizadas	8
2.2 Procesos de maduración y cambios fisicoquímicos	9
2.2.1 Clasificación climatéricos y no climatéricos	9
2.2.2 Maduración en frutos climatéricos	10
2.2.3 Maduración en frutos no climatéricos	11
2.2.4 Cambios fisicoquímicos generales durante la maduración	11
2.3 Composición nutricional y perfil de compuestos bioactivos	13
2.3.1 Composición proximal y mineral	13
2.3.2 Compuestos funcionales	15
Compuestos fenólicos	15
Flavonoides	16
Taninos	17
Antocianinas	19
Carotenoides	20

Vitamina C (ácido ascórbico).....	21
2.4 Capacidad antioxidante y su evaluación.....	22
2.5 Métodos de evaluación de la capacidad antioxidante	22
2.6 Factores que afectan la capacidad antioxidante.....	24
2.7 Potencial nutracéutico y funcional de las frutas silvestres y subutilizadas.....	25
2.8 Importancia etnobotánica y relevancia cultural.....	27
2.9 Uso de frutas nativas y subutilizadas en la obtención de bebidas fermentadas	29
2.10 Perspectivas para la investigación y el aprovechamiento sostenible .	31
2.11 Literatura citada	33
3 CAMBIOS EN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS, FISIOLÓGICAS Y ANTIOXIDANTES DE FRUTOS DE <i>Parathesis psychotrioides</i> DURANTE LA MADURACIÓN	42
Resumen.....	42
Abstract	43
3.1 Introducción	44
3.2 Materiales y métodos.....	45
3.2.1 Obtención del material vegetal	45
3.2.2 Caracterización física	45
Peso promedio	45
Dimensiones.....	45
Firmeza	45
Color.....	46
3.2.3 Obtención de extractos.....	46
3.2.4 Caracterización química	46
Acidez titulable (AT) y pH	46
Sólidos solubles totales (SST).....	46
El índice de madurez (SST/AT):	46
Azúcares solubles totales (AST)	47
Azúcares reductores (AR)	47
3.2.5 Caracterización fisiológica.....	47

Tasa de respiración (TR)	47
Pérdida de peso acumulado	48
3.2.6 Propiedades antioxidantes	48
Fenoles totales	48
Taninos condensados (proantocianidinas)	48
Flavonoides totales	48
Antocianinas monoméricas	49
Capacidad antioxidante	49
3.2.7 Análisis estadístico	49
3.3 Resultados y discusión	50
3.3.1 Características físicas: peso, morfología, firmeza y color.....	50
3.3.2 Características químicas: pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, índice de madurez, azúcares solubles totales y azúcares reductores 53	
3.3.3 Características fisiológicas: tasa respiratoria y pérdida de peso acumulado	57
3.3.4 Propiedades antioxidantes: contenido de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, antocianinas y capacidad antioxidante.....	58
3.4 Conclusiones	63
3.5 Literatura citada	64
4 COMPOSICIÓN NUTRICIONAL Y POTENCIAL FUNCIONAL DE <i>Parathesis psychotrioides</i> , UN FRUTO SILVESTRE CONSUMIDO TRADICIONALMENTE POR COMUNIDADES TOTONACAS EN MÉXICO.....	70
Resumen	70
Abstract	71
4.1 Introduction	72
4.2 Material and methods	73
4.2.1 Obtaining ethnobotanical information	73
4.2.2 Sample collection and preparation	74
4.2.3 Compound extraction	74
4.2.4 Morphological and physicochemical characterization.....	75
Average weight.....	75
Dimensions and sphericity index	75

Total soluble solids (TSS).....	75
Titratable acidity (TA) and pH	75
Maturity Index (TSS/TA)	75
Moisture content.....	75
4.2.5 Determination of nutritional properties.....	75
Proximal analysis	75
Total gross energy	76
4.2.6 Determination of the total phenolic, total flavonoid, total anthocyanin, and condensed tannin contents and antioxidant capacity	76
Total phenolic content.....	76
Total flavonoid content.....	76
Concentration of monomeric anthocyanins	77
Determination of condensed tannins (proanthocyanidins).....	77
Antioxidant capacity (ABTS method).....	77
Antioxidant capacity (FRAP method).....	77
Antioxidant capacity (DPPH method)	77
4.2.7 Statistical analysis	78
4.3 Results and discussion	78
4.3.1 Ethnobotanical importance	78
4.3.2 Morphological characteristics of the fruit	79
4.3.3 Physicochemical characteristics of the fruit	80
4.3.4 Proximate and mineral composition.....	81
4.3.5 Functional compounds	86
4.4 Conclusions	89
4.5 References	90
5 ELABORACIÓN DE UNA BEBIDA FERMENTADA A BASE DE FRUTOS DE <i>Parathesis psychotrioides</i>	96
Resumen.....	96
Abstract	97
5.1 Introducción	98
5.2 Materiales y métodos.....	99
5.2.1 Elaboración de la bebida fermentada	99

Preparación del inóculo	99
Fermentación alcohólica.....	99
Clarificación, estabilización y embotellado	100
5.2.2 Procesamiento de las muestras	100
5.2.3 Caracterización química	100
Acidez titulable (AT) y pH	100
Sólidos solubles totales (SST).....	101
Azúcares solubles totales (AST)	101
Azúcares reductores (AR)	101
Etanol	101
5.2.4 Modelado cinético del proceso fermentativo	101
Consumo de sustrato	101
Producción de alcohol	102
Rendimiento global de conversión de alcohol	102
Criterios de selección de los modelos	103
5.2.5 Evaluación de la dinámica de compuestos bioactivos y su capacidad antioxidante	103
Fenoles totales	103
Taninos condensados (proantocianidinas)	103
Flavonoides totales	104
Antocianinas monoméricas	104
Capacidad antioxidante	104
5.2.6 Cumplimiento normativo.....	104
5.2.7 Aceptación sensorial	105
5.2.8 Análisis estadístico	105
5.3 Resultados y discusión	105
5.3.1 Cambios químicos durante la fermentación	105
5.3.2 Modelado cinético del proceso fermentativo	108
5.3.3 Dinámica de los compuestos funcionales y capacidad antioxidante 110	
5.3.4 Cumplimiento normativo.....	115
5.3.5 Aceptación sensorial	117
5.4 Conclusiones	117

5.5	Literatura citada.....	118
6	CONCLUSIONES GENERALES	126

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica de los frutos de <i>P. psychotrioides</i> y de otras especies de capulín	80
Cuadro 2. Análisis proximal de los frutos de <i>P. psychotrioides</i> y de otras especies de capulín.	83
Cuadro 3. Contenido mineral de <i>P. psychotrioides</i> y de otras especies de capulín.	84
Cuadro 4. Componentes funcionales de los frutos de <i>P. psychotrioides</i> y de otras especies de capulín.	89
Cuadro 5. Especificaciones según la NOM-199-SCFI-2017 para bebidas alcohólicas	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estadios de maduración del fruto de <i>P. psychotrioides</i> según su desarrollo fisiológico	50
Figura 2. Cambios en las propiedades fisicoquímicas y fisiológicas de frutos de <i>P. psychotrioides</i> durante seis estadios de maduración.....	56
Figura 3. Cambios en las características fisiológicas de frutos de <i>P. psychotrioides</i> durante seis estadios de maduración.....	58
Figura 4. Cambios en los compuestos fenólicos y propiedades antioxidantes de frutos de <i>P. psychotrioides</i> durante seis estadios de maduración.....	58
Figura 5. Mapa de calor de los coeficientes de correlación de Spearman entre la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles totales, taninos, flavonoides, antocianinas y los estadios de maduración de los frutos de <i>P. psychotrioides</i> .	63
Figura 6. Frutos de <i>P. psychotrioides</i> en la planta.	79
Figura 7. Cambios fisicoquímicos durante el proceso de fermentación alcohólica.....	105
Figura 8. Dinámica de consumo de azúcar y producción de etanol durante el proceso de fermentación alcohólica.....	110
Figura 9. Cambios en los compuestos fenólicos y propiedades antioxidantes durante el proceso de fermentación alcohólica.....	115

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), por el invaluable apoyo financiero otorgado mediante la beca de estudios de posgrado, sin el cual la realización de esta investigación no hubiera sido posible.

Al pueblo mexicano, por su amabilidad, calidez y generosidad al recibirme en su país, permitiéndome sentir que este también es mi hogar.

A la Universidad Autónoma Chapingo y, de manera particular, al Posgrado en Ciencias y Tecnología Agroalimentaria, por haberme brindado la oportunidad de formar parte de su distinguido programa de estudios y contribuir así a mi formación académica y profesional.

Al Laboratorio de Productos Naturales del Departamento de Preparatoria Agrícola y a los compañeros que lo integran, por su apoyo incondicional y la confianza depositada en mí para el desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Diana Guerra Ramírez, por su invaluable acompañamiento, calidez humana y entusiasmo constante durante todo el desarrollo de este trabajo. Su guía fue fundamental para la culminación exitosa de esta investigación.

A los doctores Guillermina Hernández Rodríguez, Diana Becerra Morales y Salvador Valle Guadarrama, por su valiosa participación, apoyo profesional y meticulosa revisión durante la realización de esta investigación. Sus observaciones y sugerencias enriquecieron significativamente este trabajo.

A la comunidad de Ecatlán, Puebla, por abrirme las puertas de su hogar y permitirme conocer su rica cultura y sabiduría ancestral. Su hospitalidad y generosidad quedarán por siempre en mi memoria.

DATOS BIOGRÁFICOS



Guillermo Andrés Parrado Castro, originario de Villavicencio, Meta, Colombia, cursó sus estudios de pregrado en Ingeniería Agroindustrial en la Universidad de los Llanos, donde obtuvo su título en 2019. Su trabajo de tesis, titulado “Evaluación de la estabilidad colorante del extracto de *Justicia secunda* Vahl como alternativa de sustitución de colorantes azoicos en leches fermentadas”, se enfocó en el uso de colorantes naturales como opción sostenible en la industria alimentaria.

En 2023 migró a México para iniciar sus estudios de maestría en la Universidad Autónoma Chapingo, donde se integró al Laboratorio de Productos Naturales del Departamento de Preparatoria Agrícola. Su investigación de posgrado, titulada “Caracterización fisiológica, valor nutracéutico y aprovechamiento fermentativo de frutos de *Parathesis psychotrioides*”, profundizó en el estudio de frutos silvestres con potencial funcional y aplicaciones en alimentos fermentados.

RESUMEN GENERAL

CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA, VALOR NUTRACÉUTICO Y APROVECHAMIENTO FERMENTATIVO DE FRUTOS DE *Parathesis psychotrioides*

La concentración de la producción agrícola en un número limitado cultivos ha reducido la biodiversidad alimentaria global, desplazando especies nativas, afectando tanto la diversidad y seguridad alimentaria, como la preservación de conocimientos tradicionales. *Parathesis psychotrioides* conocido como aktala'huat o capulín del monte, pertenece a la familia Primulaceae y es un fruto silvestre de importancia para las comunidades totonacas de la Sierra Norte de Puebla. Sin embargo, su aprovechamiento es limitado debido a su alta perecibilidad y escasa información científica disponible sobre sus características y aplicaciones alimentarias. El objetivo de esta investigación fue evaluar la fisiología, composición química, potencial nutraceutico de los frutos de *P. psychotrioides*, así como explorar su uso en la elaboración de una bebida fermentada, como estrategia de valorización, conservación y aprovechamiento. Se determinó la composición proximal y mineral, y se analizaron los cambios fisicoquímicos, fisiológicos, y las propiedades antioxidantes durante la maduración. Asimismo, se evaluaron los parámetros cinéticos, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de la bebida fermentada. Los resultados mostraron diferencias significativas en los contenidos de azúcares y compuestos fenólicos, así como en la acidez titulable, durante la maduración. Los frutos en madurez de consumo presentaron altas concentraciones de compuestos fenólicos, y por lo tanto una capacidad antioxidante comparable a otras especies silvestres de frutos rojos (ABTS: 5636.21 ± 273.02 , DPPH: 3218.11 ± 17.63 y FRAP: 3395.45 ± 151.17 $\mu\text{mol ET } 100 \text{ g}^{-1}$ peso fresco). además, destacaron por su contenido de potasio, fósforo, magnesio, hierro y zinc. La fermentación generó una bebida con 11.65 % v/v de etanol, con buena aceptación sensorial y capacidad antioxidante de 1422.16 ± 23.88 , 941.54 ± 73.15 y 1796.82 ± 99.31 mg ET L⁻¹ según los ensayos ABTS, FRAP y CUPRAC, respectivamente. Estos resultados confirman que *P. psychotrioides* es una fuente valiosa nutrientes y compuestos bioactivos, y que la fermentación representa una alternativa viable para reducir pérdidas poscosecha y promover su aprovechamiento sostenible.

Palabras clave: maduración de frutos, fisiología vegetal, frutos silvestres, alimento funcional, potencial nutraceutico, fermentación espontánea.

GENERAL ABSTRACT

PHYSIOLOGICAL CHARACTERIZATION, NUTRACEUTICAL VALUE, AND FERMENTATIVE USE OF *Parathesis psychotrioides* FRUITS

The concentration of agricultural production in a limited number of crops has reduced global food biodiversity, displacing native species and affecting both food diversity and security, as well as the preservation of traditional knowledge. *Parathesis psychotrioides*, known as aktala'huat or capulín del monte, belongs to the Primulaceae family and is a wild fruit of importance to the Totonac communities of the Sierra Norte de Puebla. However, its use is limited due to its high perishability and the scarcity of scientific information available on its characteristics and food applications. The objective of this research was to evaluate the physiology, chemical composition, and nutraceutical potential of *P. psychotrioides* fruits, as well as to explore their use in the production of a fermented beverage as a strategy for valorization, conservation, and utilization. The proximal and mineral composition was determined, and the physicochemical and physiological changes and antioxidant properties during ripening were analyzed. Likewise, the kinetic parameters, phenolic compounds, and antioxidant capacity of the fermented beverage were evaluated. The results showed significant differences in the contents of sugars and phenolic compounds, as well as in titratable acidity, during ripening. The ripe fruits for consumption had high concentrations of phenolic compounds and, therefore, antioxidant capacity comparable to other wild red fruit species (ABTS: 5636.21 ± 273.02 , DPPH: 3218.11 ± 17.63 , and FRAP: $3395.45 \pm 151.17 \mu\text{mol ET } 100 \text{ g}^{-1}$ fresh weight). They also stood out for their potassium, phosphorus, magnesium, iron, and zinc content. Fermentation produced a beverage with 11.65 % v/v ethanol, good sensory acceptance, and antioxidant capacity of 1422.16 ± 23.88 , 941.54 ± 73.15 , and $1796.82 \pm 99.31 \text{ mg ET L}^{-1}$ according to the ABTS, FRAP, and CUPRAC assays, respectively. These results confirm that *P. psychotrioides* is a valuable source of nutrients and bioactive compounds, and that fermentation represents a viable alternative for reducing post-harvest losses and promoting its sustainable use.

Keywords: fruit ripening, plant physiology, wild fruits, functional food, nutraceutical potential, spontaneous fermentation.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La dependencia global de un número reducido de especies agrícolas ha contribuido a la pérdida de biodiversidad, variedad genética y la desaparición progresiva de conocimientos tradicionales sobre los usos de especies silvestres y nativas (Barman y Mishra, 2025; Fatima et al., 2025). Como consecuencia, se ha reducido la diversidad dietética y limitado la disponibilidad de recursos vegetales con alto potencial nutricional y funcional. En respuesta, la incorporación de especies subutilizadas y endémicas se plantea como una estrategia para fortalecer la seguridad alimentaria y conservar el patrimonio biocultural (Coyago-Cruz et al., 2025; Lima et al., 2025; Mahapatra y Panda, 2012).

Los frutos silvestres y nativos representan una fuente natural de carbohidratos, proteínas, vitaminas, minerales y metabolitos secundarios bioactivos, como fenoles, flavonoides, antocianinas y taninos, que confieren propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas (Coyago-Cruz et al., 2025; Fatima et al., 2025; Lima et al., 2025; Souto et al., 2025). Además de su relevancia nutricional, estos frutos desempeñan un papel fundamental en la identidad cultural y alimentaria de numerosas comunidades rurales e indígenas (Ahmed et al., 2022). En regiones como los Himalayas, la Amazonía y el Cerrado brasileño, su aprovechamiento ha sido documentado tanto por su valor terapéutico como por su uso en dietas tradicionales y prácticas rituales (Barman y Mishra, 2025; Coyago-Cruz et al., 2025; T. C. Santos et al., 2025). No obstante, pese a su potencial, la mayoría de estas especies siguen siendo poco estudiadas y escasamente incorporadas a los sistemas de producción o a las cadenas agroindustriales.

En México, los frutos silvestres representan un componente fundamental del acervo biocultural. Sin embargo, la falta de estudios sobre su composición química, dinámica de maduración y comportamiento fisiológico limita su aprovechamiento y su integración en estrategias de conservación y valorización económica. En este contexto, destacan los miembros de las familias Myrtaceae, Ericaceae y Primulaceae, las cuales concentran especies con alto contenido de compuestos fenólicos y propiedades nutraceuticas (Escobar-Barranco et al., 2025; Machado et al., 2025). Dentro de esta última familia, el capulín del monte (*Parathesis psychotrioides* Lundell) constituye un recurso nativo subutilizado, estrechamente vinculado con la alimentación y las tradiciones de las comunidades totonacas de la Sierra Norte de Puebla.

El género *Parathesis* (Primulaceae) agrupa 96 especies distribuidas desde México hasta el norte de Sudamérica (Ricketsen y Pipoly, 2008). La especie *P. psychotrioides* produce drupas de color violeta conocidas localmente como “aktala’huat” en lengua totonaca y “xalcapolin” en náhuatl (Taxonomy, s. f.). Sin embargo, existen otras drupas de distintos géneros con características físicas similares, que pertenecen a un conjunto de especies comúnmente llamadas “capulín” o “capulí”, aunque difieren en su clasificación taxonómica, composición química y usos tradicionales (Lascurain et al., 2010; Mahmood et al., 2014; Pathania et al., 2022). Entre ellas, *Prunus serotina* y *Ardisia compressa* han sido reportadas como fuentes de compuestos fenólicos, pigmentos naturales y con elevada capacidad antioxidante y potencial antihipertensivo (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013). En contraste, *P. psychotrioides* continúa siendo una especie escasamente investigada, sin valor comercial definido y consumo restringido al ámbito local.

La maduración de los frutos constituye un proceso fisiológico clave que determina su calidad, aceptabilidad y valor nutraceutico. Durante este proceso ocurren transformaciones morfológicas y fisicoquímicas, como el ablandamiento del tejido, el cambio de color, la acumulación de azúcares y la disminución de la acidez, además de modificaciones en la concentración y actividad de los

compuestos bioactivos (Fatima et al., 2025; Sousa Silva et al., 2026). Sin embargo, para especies nativas como *P. psychotrioides* no existen estudios que describan estos procesos ni su relación con la calidad final del fruto. Esta carencia de información limita el desarrollo de estrategias de cosecha, conservación y transformación adecuadas. Ante esta problemática, la fermentación surge como una alternativa biotecnológica viable para conservar y valorizar frutos perecederos con alto contenido de compuestos funcionales (Contreras et al., 2025; J. Zhang et al., 2025).

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue caracterizar los cambios fisiológicos, fisicoquímicos y antioxidantes durante la maduración de frutos de *Parathesis psychotrioides*, determinar su composición nutricional y potencial nutracéutico, y evaluar su aprovechamiento mediante fermentación alcohólica como estrategia de valorización, conservación y desarrollo de productos con valor agregado, con el propósito de generar información científica que favorezca su uso y manejo sostenible.

Con base en este objetivo, se planteó la hipótesis de que los frutos de *Parathesis psychotrioides* presentan un perfil fisicoquímico, nutricional y funcional comparable al de otros frutos comerciales reconocidos por su elevada capacidad antioxidante y que, mediante procesos de fermentación controlada, es posible desarrollar una bebida con valor agregado que favorezca su aprovechamiento sostenible y a la preservación de su valor cultural.

Para comprobar esta hipótesis, la investigación se estructuró en seis capítulos que abordan de manera progresiva los aspectos teóricos, fisiológicos, nutracéuticos y tecnológicos del fruto:

El presente capítulo expone el contexto y la justificación del estudio, resaltando la importancia de los frutos silvestres y nativos como recursos alimentarios y bioculturales, así como la problemática derivada de su limitado aprovechamiento y del escaso conocimiento científico existente sobre ellos. Asimismo, se introduce

la especie *Parathesis psychotrioides* como objeto de estudio, se plantea la hipótesis central y se describe la estructura general de la investigación.

El segundo capítulo presenta una revisión de literatura sobre los frutos silvestres y subutilizados, con énfasis en sus procesos de maduración, composición nutricional, mineral y de compuestos fenólicos, así como su potencial nutracéutico y su relevancia etnobotánica. Este análisis permitió contextualizar el estudio de *P. psychotrioides* dentro del marco global de los recursos frutales nativos y establecer los fundamentos teóricos que sustentan la investigación.

El tercero capítulo tiene como propósito caracterizar los cambios morfológicos, químicos y antioxidantes que experimentan los frutos de *P. psychotrioides* durante su maduración, con el fin de comprender los procesos fisiológicos que determinan su calidad y establecer las bases para su manejo poscosecha.

El cuarto capítulo se enfoca en la caracterización nutricional de los frutos maduros de *P. psychotrioides*, con el propósito de determinar su composición de macro y micronutrientes, compuestos fenólicos, y evaluar su capacidad antioxidante, a fin de definir su potencial nutracéutico y su relevancia dentro de la alimentación tradicional totonaca.

El quinto capítulo aborda la elaboración y evaluación de una bebida fermentada a partir de los frutos de *P. psychotrioides*, analizando los cambios fisicoquímicos, las cinéticas de consumo de azúcares y producción de etanol, así como el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante durante el proceso de fermentación, con el objetivo de desarrollar una alternativa tecnológica que contribuya a su conservación, valorización y aprovechamiento local.

Finalmente, el sexto capítulo reúne las conclusiones generales de la investigación, resaltando la contribución de los resultados al conocimiento y valorización sostenible de frutos silvestres nativos mexicanos.

1.1 Literatura citada

- Ahmed, S., Warne, T., Stewart, A., Shanks, C. B., y Dupuis, V. (2022). Role of wild food environments for cultural identity, food security, and dietary quality in a rural American state. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.774701>
- Barman, M., y Mishra, P. (2025). Comprehensive review on ethnobotanical, nutritional and functional properties of wild edible fruits of North Eastern Himalaya, India. *Journal of Food Science and Technology*, 62(8), 1407–1424. <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06351-7>
- Contreras, L., Isla, M. I., y Torres, S. (2025). Selection of novel starter lactic acid bacteria with probiotic potential native to chilito (*Solanum betaceum*) fruits. *Food Bioscience*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107200>
- Coyago-Cruz, E., Méndez, G. I., Escobar-Quíñonez, R., Cerna, M. F., y Heredia-Moya, J. (2025). *Lacmellea oblongata* and other undervalued Amazonian fruits as functional, antioxidant, and antimicrobial matrices. *Antioxidants*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/antiox14080924>
- Escobar-Barranco, N., Gil Archila, E., Villamil, R. A., y Bonilla, A. (2025). Chemical and nutritional value of Colombian Ericaceae with edible fruits. *Food Chemistry Advances*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101045>
- Fatima, S. K., Khan, R. T., Nazir, M., Manzoor, M. T., Gillani, S. W., Munir, M., Nasir, M., Akhtar, W., Ahmad, S., Binobead, M. A., y Ajmal Ali, M. (2025). Exploration of medicinal and nutritional value of Himalayan wild edible fruits: Implications for sustainable health and functional foods. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(8), 10071–10091. <https://doi.org/10.1007/s10722-025-02557-y>
- GBIF Secretariat. (s. f.). *Parathesis psychotrioides* Lundell. GBIF. <https://www.gbif.org/es/species/3722099>
- Joaquín-Cruz, E., Dueñas, M., García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., Santos-Buelga, C., y García-Salinas, C. (2015). Anthocyanin and phenolic characterization, chemical composition and antioxidant activity of chagalapoli (*Ardisia compressa* K.) fruit: A tropical source of natural pigments. *Food Research International*, 70, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.033>
- Lascurain, M., Avendaño, S., Amo, S. del, y Niembro, A. (2010). Guía de frutos silvestres comestibles en Veracruz. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal; CONAFOR–CONACYT.
- Lima, A. A. S., Conceição, L. D. S., da Silva Cardoso, P., Teixeira, K. L., Cruz, R. D. C. M. D., y Otero, D. M. (2025). Nutritional and bioactive composition of *Campomanesia phaea* and its current technological applications. *Food and Humanity*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100783>

- Luna-Vázquez, F. J., Ibarra-Alvarado, C., Rojas-Molina, A., Rojas-Molina, J. I., Yahia, E. M., Rivera-Pastrana, D. M., Rojas-Molina, A., y Zavala-Sánchez, M. Á. (2013). Nutraceutical value of black cherry *Prunus serotina* Ehrh. fruits: Antioxidant and antihypertensive properties. *Molecules*, 18(12), 14597–14612. <https://doi.org/10.3390/molecules181214597>
- Machado, P. G., Molina, F. S., Barcia, M. T., y Ballus, C. A. (2025). The Brazilian native fruits araçá, guabijú, and guabiroba: A brief and integrative review on their phenolic composition and analytical methods. *Foods*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/foods14162858>
- Mahapatra, A. K., y Panda, P. C. (2012). Wild edible fruit diversity and its significance in the livelihood of indigenous tribals: Evidence from eastern India. *Food Security*, 4(2), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0186-z>
- Mahmood, N. D., Nasir, N. L. M., Rofiee, M. S., Tohid, S. F. M., Ching, S. M., Teh, L. K., Salleh, M. Z., y Zakaria, Z. A. (2014, diciembre). *Muntingia calabura*: A review of its traditional uses, chemical properties, and pharmacological observations. *Pharmaceutical Biology*, 52(12), 1598–1623. <https://doi.org/10.3109/13880209.2014.908397>
- Pathania, S., Itle, R. A., Chávez, C. R., Lema, L. F., Caballero-Serrano, V., Carrasco, J. C., y Chavez, D. J. (2022). Fruit characterization of *Prunus serotina* subsp. *capuli*. *Horticulturae*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090838>
- Ricketson, J. M., y Pipoly, J. J. (2008). A new species of *Parathesis* (Myrsinaceae) from Colombia. *Novon*, 18(2), 241–243. <https://doi.org/10.3417/2006155>
- Santos, T. C., Fonseca, H. C., Durães, C. A. F., Fonseca, R. S., y de Lima, J. P. (2025). Physicochemical characterisation of a new Myrtaceae fruit native to Brazilian Cerrado. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53(5), 1496–1509. <https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2373294>
- Sousa Silva, N. D., Santos Silva, G., Grisi, C. V. B., Vieira, V. B., Alves Dantas, C. E., Camêlo Guimarães, G. H., y Sucupira Maciel, M. I. (2026). Effect of yam starch coating with aroeira leaf extract on post-harvest quality preservation of ‘Tommy’ mangoes. *Food Control*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111659>
- Souto, R. N. M., Pinho, J. D. S., Peixe, C. L. D., Trindade, M. E. F., de Souza, P. G., da Silva, P. E., Teixeira-Costa, B. E., Castelo-Branco, V. N., y Teodoro, A. J. (2025). Buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.) and Acuri (*Attalea phalerata* Mart. ex Spreng) oils as functional lipid sources in bakery products: Bioactive composition, sensory evaluation, and technological performance. *Foods*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/foods14173089>
- Zhang, J., Phan, A. D. T., Netzel, M. E., Pengelly, A., Sivakumar, D., y Sultanbawa, Y. F. (2025). Exploring the functional food potential of edible *Persoonia* spp.: Nutritional composition, bioactive properties and phenolic

metabolomics. Food Chemistry, 495.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146355>

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Frutas silvestres y subutilizadas

Las frutas silvestres y subutilizadas representan un componente clave de la biodiversidad alimentaria en regiones tropicales, donde constituyen fuentes tradicionales de nutrición y medicina para comunidades locales (Barman y Mishra, 2025; Coyago-Cruz et al., 2025; Fatima et al., 2025). Estas especies, pertenecientes a familias como Myrtaceae, Solanaceae, Anacardiaceae, Arecaceae, Ericaceae, Annonaceae y Sapotaceae, han sido relegadas de los sistemas agrícolas comerciales debido a la escasa investigación agronómica, las limitaciones en infraestructura poscosecha y el desconocimiento del consumidor urbano (Contreras et al., 2025; Coyago-Cruz et al., 2025; Escobar-Barranco et al., 2025; Lima et al., 2025; Machado et al., 2025; T. C. Santos et al., 2025; Souto et al., 2025). Sin embargo, en las últimas décadas su potencial nutricional y funcional ha despertado un creciente interés científico e industrial.

En América Latina, la diversidad de frutas nativas es especialmente notable. Ejemplos como el umbu (*Spondias tuberosa*), el araçá (*Psidium cattleianum*), el guabijú (*Myrcianthes pungens*), el cambuci (*Campomanesia phaea*) y la gabioba (*Campomanesia cambessedesana*) forman parte del patrimonio alimentario regional y destacan por su riqueza en compuestos bioactivos (da Cruz et al., 2024; D. L. da Silva et al., 2024; Lima et al., 2025; Machado et al., 2025). Asimismo, especies andinas como el lulo (*Solanum quitoense*) han mostrado alto contenido de vitamina C, fenoles y capacidad antioxidante (Obregón et al., 2024).

Los estudios coinciden en que estos frutos presentan concentraciones elevadas de fenoles, flavonoides, antocianinas y carotenoides, superando en muchos casos a las frutas convencionales (Coyago-Cruz et al., 2025; Machado et al., 2025). También son fuentes importantes de fibra, minerales esenciales (Ca, Mg,

K, Fe, Zn) y vitamina C, lo que refuerza su potencial como ingredientes funcionales en la alimentación humana (D. L. da Silva et al., 2024; Lima et al., 2025). No obstante, su aprovechamiento enfrenta retos derivados de su alta perecibilidad, marcada estacionalidad y variabilidad genética, características propias de especies no domesticadas (Fischer et al., 2024). Se ha demostrado que mediante estrategias de manejo poscosecha y la aplicación de recubrimientos comestibles es posible prolongar su vida útil y mantener su calidad nutricional (Jiménez et al., 2025; Sousa Silva et al., 2026).

2.2 Procesos de maduración y cambios fisicoquímicos

2.2.1 Clasificación climatéricos y no climatéricos

El proceso de maduración comprende una serie de transformaciones fisiológicas, bioquímicas y estructurales que determinan la calidad sensorial, la estabilidad poscosecha y el valor nutricional de los frutos (Huang et al., 2024; Luo et al., 2025). Tradicionalmente, los frutos se clasifican como climatéricos o no climatéricos según el comportamiento respiratorio y la producción de etileno; sin embargo, estudios recientes han mostrado que esta distinción es menos rígida de lo que se suponía (de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al., 2024; Gadelha et al., 2024).

En el umbu-cajá (*Spondias tuberosa* × *S. mombin*), se ha observado un aumento gradual de la tasa respiratoria y de la producción de etileno en los estadios finales de maduración, lo que sugiere un comportamiento intermedio dentro del continuo climatérico (Gadelha et al., 2024). De manera similar, en el guabijú (*Myrcianthes pungens*), considerado no climatérico, se registraron incrementos transitorios en la respiración y en los sólidos solubles totales, indicando una respuesta fisiológica variable según las condiciones ambientales y el grado de desarrollo del fruto (de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al., 2024). Estas observaciones respaldan la idea de que el comportamiento climatérico puede reflejar un gradiente fisiológico, influenciado por la genética, la disponibilidad hídrica y el manejo poscosecha (Luo et al., 2025).

2.2.2 Maduración en frutos climatéricos

Los frutos climatéricos se caracterizan por un marcado incremento en la tasa respiratoria y una producción autocatalítica de etileno, lo que activa una cascada de reacciones metabólicas que afectan la textura, el color, el sabor y el aroma (Bautista-Valle et al., 2024; Niu et al., 2025). En especies tropicales como el mango (*Mangifera indica*), la banana (*Musa spp.*), el aguacate (*Persea americana*) y la pitahaya (*Hylocereus spp.*, *Selenicereus megalanthus*), el etileno regula la expresión de genes involucrados en la biosíntesis de carotenoides, la degradación de pectinas y el metabolismo de azúcares (Erazo-Lara et al., 2024; Huang et al., 2024; Shankar et al., 2025).

Durante la maduración del mango, por ejemplo, ocurre un aumento de la respiración hasta alcanzar el pico climatérico, acompañado de la pérdida de firmeza por acción de enzimas como la poligalacturonasa, la pectinmetilesterasa y la celulasa, que degradan los polisacáridos de la pared celular (Bautista-Valle et al., 2024; Ghag et al., 2024). Paralelamente, se incrementan los sólidos solubles totales y disminuye la acidez titulable, mientras que la clorofila se degrada y se acumulan carotenoides responsables de las tonalidades amarillas y anaranjadas (Asghar et al., 2024).

El cambio de color, uno de los indicadores más visibles de maduración, está regulado por la vía de los flavonoides. En pitahaya, la expresión de genes como PAL, CHS, CHI, DFR y ANS promueve la síntesis de antocianinas y betalainas que confieren los colores rojo y púrpura del pericarpio (Erazo-Lara et al., 2024; Niu et al., 2025). Estudios en frutos nativos latinoamericanos, como el cambuci y el araçá, también reportan una acumulación progresiva de pigmentos y compuestos fenólicos durante la maduración, asociados con el incremento de la capacidad antioxidante (Lima et al., 2025; Machado et al., 2025).

2.2.3 Maduración en frutos no climatéricos

Los frutos no climatéricos no presentan un aumento marcado en la tasa respiratoria ni una producción autocatalítica de etileno, por lo que deben cosecharse maduros, ya que su desarrollo poscosecha es limitado (Asghar et al., 2024; Rymbai et al., 2024). En el cerezo del Himalaya (*Prunus jenkinsii*), se ha observado que el peso, el contenido de pulpa, los sólidos solubles totales, los carbohidratos y la capacidad antioxidante aumentan hasta el estado maduro, mientras que la firmeza y el ácido ascórbico disminuyen (Rymbai et al., 2024).

En el mangostán (*Garcinia mangostana*), la maduración implica una acumulación progresiva de antocianinas en el pericarpio, principalmente cianidina-soforósido y cianidina-glucósido, sin que se produzca un pico respiratorio típico, aunque el etileno endógeno regula parcialmente la maduración (Ketsa y Warrington, 2024). Además, el endurecimiento del pericarpio tras impactos mecánicos se relaciona con el incremento de lignina y la reducción de fenoles totales (Herner y Ketsa, 2025). Otro ejemplo es la carambola (*Averrhoa carambola*), donde la aplicación de melatonina exógena durante el almacenamiento poscosecha mantiene la firmeza, reduce la acidez titulable y preserva los compuestos antioxidantes, gracias a la activación de sistemas enzimáticos como catalasa, peroxidasa y superóxido dismutasa (Mohd Yusof et al., 2025). Finalmente, estudios en frutos himalayos no climatéricos, como *Diospyros lotus* y *Myrica esculenta*, también muestran que la maduración conlleva una disminución gradual de la acidez y un incremento de los compuestos fenólicos y flavonoides hasta el punto óptimo de consumo (Barman y Mishra, 2025; Fatima et al., 2025).

2.2.4 Cambios fisicoquímicos generales durante la maduración

Independientemente de su comportamiento climatérico o no climatérico, todos los frutos experimentan cambios fisicoquímicos característicos a lo largo del proceso de maduración, los cuales determinan su calidad organoléptica, aceptación sensorial y valor nutricional. Estos cambios comprenden la modificación del contenido de ácidos orgánicos, azúcares, pigmentos, humedad, textura y compuestos bioactivos, resultado de la interacción entre factores genéticos,

fisiológicos y ambientales (R. R. da Silva et al., 2025; Gadelha et al., 2024; Rymbai et al., 2024).

Durante la maduración, la acidez titulable tiende a disminuir debido al consumo de ácidos orgánicos, principalmente cítrico, málico y tartárico, como sustratos respiratorios, aunque la magnitud de esta reducción varía entre especies y etapas de desarrollo (Gadelha et al., 2024; Rymbai et al., 2025). En el umbu-cajá (*Spondias tuberosa* × *S. mombin*), el análisis por HPLC reveló que los ácidos cítrico, málico, glicólico y láctico son los principales constituyentes, con predominio del ácido cítrico durante todo el proceso de maduración (Gadelha et al., 2024). De manera análoga, en el cerezo del Himalaya (*Prunus jenkinsii*), la acidez y el contenido de ácido ascórbico disminuyen progresivamente a medida que el fruto alcanza la madurez, mientras que los azúcares solubles y los compuestos fenólicos se incrementan (Rymbai et al., 2024).

El contenido de humedad generalmente se mantiene estable, aunque puede reducirse ligeramente por pérdidas transpiratorias o deshidratación superficial en los estadios avanzados (D. L. da Silva et al., 2024; Garcés-Moncayo et al., 2025). En frutos ricos en almidón, como la banana o el mango, la materia seca se modifica significativamente debido a la conversión del almidón en azúcares simples, proceso que contribuye al incremento de los sólidos solubles totales y a la mejora del sabor (Asghar et al., 2024; Huang et al., 2024).

Los cambios de color constituyen otro rasgo visual asociado a la maduración. Estos pueden cuantificarse mediante el sistema CIELAB, donde el parámetro L^* (luminosidad) refleja el grado de brillo del fruto, a^* indica la transición de verde a rojo y b^* la de azul a amarillo. En general, los frutos que acumulan carotenoides o antocianinas muestran incrementos en los valores de a^* y b^* , mientras que la degradación de la clorofila reduce la tonalidad verde (Asghar et al., 2024; Erazo-Lara et al., 2024; Rymbai et al., 2024). Estos cambios de pigmentación, observados en especies como la pitahaya, el cambuci y el araçá, se asocian con la síntesis de compuestos antioxidantes y la mejora del atractivo visual del fruto (Erazo-Lara et al., 2024; Lima et al., 2025; Machado et al., 2025).

La relación entre los sólidos solubles totales (SST) y la acidez titulable es uno de los indicadores más confiables de madurez fisiológica y calidad sensorial. En diversas frutas silvestres, esta relación aumenta conforme progresa la maduración debido al incremento de los azúcares reductores y la reducción de los ácidos orgánicos (Gadelha et al., 2024; Rymbai et al., 2025). En *P. jenkinsii*, el estadio maduro presentó los valores óptimos de SST/acidez, coincidiendo con el máximo contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante (Rymbai et al., 2024). Resultados similares se han descrito en frutos de *Myrcianthes pungens* y *Campomanesia phaea*, donde el aumento de esta relación refleja una mejora en la palatabilidad y el desarrollo de características sensoriales deseables (de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al., 2024; Lima et al., 2025).

2.3 Composición nutricional y perfil de compuestos bioactivos

2.3.1 Composición proximal y mineral

La composición nutricional de las frutas silvestres y subutilizadas es diversa y, en muchos casos, supera la calidad nutricional y funcional de las frutas comerciales, al constituir fuentes relevantes de carbohidratos, fibra, minerales, vitaminas y compuestos bioactivos con propiedades nutraceuticas (Coyago-Cruz et al., 2025; Escobar-Barranco et al., 2025; Lima et al., 2025). Dichas características dependen de la especie, el grado de madurez, el tejido analizado y las condiciones agroecológicas, lo que explica la variabilidad observada en su composición proximal y fitoquímica (D. L. da Silva et al., 2024; Machado et al., 2025).

Los carbohidratos son el principal componente energético, representados principalmente por azúcares simples como glucosa, fructosa y sacarosa. Su proporción suele aumentar durante la maduración debido a la degradación del almidón y la conversión de polisacáridos en monosacáridos (Asghar et al., 2024; Huang et al., 2024). En frutos silvestres latinoamericanos, como el guabijú (*Myrcianthes pungens*), predominan la fructosa y la glucosa, mientras que en la

gabioba (*Campomanesia cambessedesana*) se ha registrado una mayor proporción de maltosa (D. L. da Silva et al., 2024; de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al., 2024). En términos generales, los contenidos de azúcares totales se encuentran entre 8 y 25 % en base fresca, dependiendo de la especie y el estadio de madurez. La fibra dietética, tanto soluble como insoluble, constituye otro componente importante que contribuye al valor funcional de estas frutas. En especies de Arecaceae, como el burití (*Mauritia flexuosa*), la cáscara y pulpa presentan elevados niveles de fibra y carotenoides, con un alta capacidad antioxidante *in vitro*, atribuida a su contenido de polifenoles (Carlos de Sousa et al., 2024).

El contenido proteico en la parte comestible de los frutos es generalmente bajo (1–3 %), aunque puede ser más alto en semillas y endospermos. Estas proteínas contienen aminoácidos esenciales como leucina, isoleucina, valina y lisina, lo que aumenta su valor nutricional (D. L. da Silva et al., 2024; Dhara et al., 2025). En algunas especies amazónicas y del Cerrado brasileño, las semillas pueden alcanzar contenidos de proteína cercanos al 20 %, lo que amplía su potencial como materia prima alimentaria y nutracéutica (Coyago-Cruz et al., 2025; T. C. Santos et al., 2025).

Los lípidos están presentes en proporciones variables (0.1–40 %), con predominio de ácidos grasos insaturados, oleico, linoleico y linolénico, que confieren valor funcional e industrial. Estos perfiles se observan en frutos como el burití (*Mauritia flexuosa*), el acurí (*Attalea phalerata*) y otras especies oleaginosas tropicales, cuyos aceites son ricos en tocoferoles y carotenoides (Gonçalves et al., 2024; Souto et al., 2025).

En cuanto a la composición mineral, las frutas nativas exhiben concentraciones notables de elementos esenciales. El potasio es generalmente el más abundante, seguido de calcio, magnesio y fósforo, con contenidos que varían ampliamente según la especie y el tejido analizado (Angami et al., 2024; Ngurthankhumi et al., 2024; P. B. Santos et al., 2025). Los microelementos hierro, zinc, manganeso y cobre también se encuentran en concentraciones relevantes, capaces de

contribuir significativamente a la ingesta diaria recomendada y al mantenimiento de la homeostasis mineral (Bhandari et al., 2025).

Entre las vitaminas, la vitamina C (ácido ascórbico) es la más destacada, con niveles especialmente altos en especies de Myrtaceae como el camu camu (*Myrciaria dubia*), el araçá (*Psidium cattleianum*) y el guabijú (*M. pungens*) (Bhandari et al., 2025; Lima et al., 2025; Machado et al., 2025). También se han reportado valores elevados en frutos de Malpighiaceae, como la acerola (*Malpighia emarginata*), y en especies de Eugenia, ampliamente distribuidas en Sudamérica (T. C. Santos et al., 2025). Las vitaminas liposolubles, especialmente los carotenoides (provitamina A) y los tocoferoles (vitamina E), se acumulan en frutos de coloración amarilla o rojiza, como el burití, la gabioba y el cambuci (Lima et al., 2025; Souto et al., 2025).

2.3.2 Compuestos funcionales

Los frutos silvestres y subutilizados constituyen una fuente importante de metabolitos secundarios con funciones fisiológicas y ecológicas en las plantas, así como efectos beneficiosos para la salud humana. Entre estos, los compuestos fenólicos, flavonoides, antocianinas y taninos son los más estudiados por su destacada capacidad antioxidante, antiinflamatoria y cardioprotectora (Coyago-Cruz et al., 2025; Lima et al., 2025; Machado et al., 2025). La concentración y el perfil de estos compuestos varían ampliamente entre especies, partes del fruto y etapas de maduración, y dependen de factores genéticos, ambientales y poscosecha (de Oliveira Raphaelli, Camargo, et al., 2024; Niu et al., 2025).

Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos conforman un grupo diverso de metabolitos secundarios derivados de la vía del ácido shiquímico, responsables de la pigmentación, la defensa contra el estrés oxidativo y la resistencia a patógenos. En los frutos, su contenido total se determina mediante el método de Folin-Ciocalteu y puede variar desde valores bajos hasta más de 1000 mg equivalentes

de ácido gálico por 100 g de peso fresco, dependiendo de la especie y el tejido analizado (Lima et al., 2025; Machado et al., 2025).

Machado et al. (2025) identificaron una amplia gama de ácidos fenólicos en frutos de *Myrcianthes pungens*, *Campomanesia xanthocarpa* y *Psidium cattleianum*, incluyendo ácidos hidroxibenzoicos (gálico, protocatecuico, p-hidroxibenzoico, vanílico y sirínigico) e hidroxicinámicos (clorogénico, cafeico, p-cumárico, ferúlico y sinápico). Estos compuestos se asocian con múltiples actividades biológicas: el ácido clorogénico presenta propiedades hipoglucémicas, el ácido gálico actividad antimicrobiana y el ácido cafeico efectos antiinflamatorios (Palomino-Hermosillo et al., 2024).

de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al. (2024) demostraron que en *M. pungens* el contenido fenólico aumenta durante la maduración y se correlaciona positivamente con la capacidad antioxidante, lo cual coincide con observaciones en *Campomanesia phaea* y *Psidium cattleianum* (Lima et al., 2025). Coyago-Cruz et al., (2025) también reportaron altos niveles de fenoles totales en frutos amazónicos, como *Annona edulis* y *Lacmellea oblongata*, en los que dichos compuestos contribuyen significativamente a la capacidad antioxidante y a la protección frente al estrés oxidativo.

Flavonoides

Los flavonoides constituyen la subclase más diversa de los compuestos fenólicos, con estructuras basadas en el esqueleto C6–C3–C6 del difenilpropano. Comprenden varias familias: flavonoles, flavanonas, flavonas, flavanoles y antocianidinas. Los cuales difieren en su grado de hidroxilación, metoxilación y glicosilación (Coyago-Cruz et al., 2025; Lima et al., 2025). Su importancia radica en su capacidad para neutralizar radicales libres, quelar metales prooxidantes e inhibir enzimas oxidativas, lo que refuerza los sistemas antioxidantes endógenos (Barman y Mishra, 2025).

En el cambuci (*Campomanesia phaea*), Lima et al. (2025) identificaron catequinas, quercetina, isorhamnetina y proantocianidinas como los flavonoides

predominantes, los cuales explican la alta capacidad antioxidante y las propiedades funcionales del fruto. Resultados similares fueron observados por Machado et al. (2025) en *Myrcianthes pungens* y *Psidium cattleianum*, donde el contenido de flavonoides aumenta con la madurez y se asocia con el desarrollo del color y del sabor característico.

Los flavonoides se distribuyen de forma diferencial entre los tejidos del fruto: en la cáscara, predominan compuestos con funciones de defensa y fotoprotección, mientras que en la pulpa intervienen principalmente en la pigmentación y la protección oxidativa de las semillas (Amorim et al., 2025; de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al., 2024). Además, su grado de glicosilación influye en la estabilidad y biodisponibilidad; los flavonoides glicosilados tienden a ser más estables durante el almacenamiento, mientras que los aglicones muestran mayor reactividad biológica y contribuyen de forma más directa a la capacidad antioxidante total de los extractos frutales (Vega et al., 2025).

Taninos

Los taninos son compuestos fenólicos de alto peso molecular ampliamente distribuidos en los frutos silvestres, reconocidos por su capacidad de interactuar con proteínas, polisacáridos y minerales a través de enlaces de hidrógeno y asociaciones hidrofóbicas (Coyago-Cruz et al., 2025; Machado et al., 2025). Desde el punto de vista estructural, se dividen en taninos hidrolizables, formados por ésteres del ácido gálico o elágico con azúcares, y taninos condensados o proantocianidinas, que son polímeros de flavan-3-oles como la catequina y la epicatequina (Lima et al., 2025; Machado et al., 2025).

Estos metabolitos secundarios cumplen funciones fisiológicas esenciales en las plantas, incluyendo la defensa contra herbívoros, la protección frente a la radiación ultravioleta y la inhibición del crecimiento microbiano. Además, participan en la regulación del proceso de maduración y en la estabilidad oxidativa del fruto (Dhara et al., 2025).

En términos sensoriales, los taninos son responsables de la astringencia y el amargor característicos de muchos frutos silvestres. Su concentración suele disminuir con la maduración debido a la polimerización y a la insolubilización progresiva, lo que mejora la palatabilidad del fruto (de Oliveira Raphaelli, Camargo, et al., 2024; Rymbai et al., 2025). En el cerezo del Himalaya (*Prunus jenkinsii*), los taninos solubles se reducen de forma significativa en los estadios finales de desarrollo, paralelamente al incremento de los sólidos solubles totales y a una mayor aceptación sensorial (Rymbai et al., 2024). Este patrón también se ha descrito en especies de *Campomanesia* y *Myrcianthes*, donde la reducción de taninos coincide con el aumento de antocianinas y carotenoides durante la maduración fruto (de Oliveira Raphaelli, Camargo, et al., 2024; Lima et al., 2025).

Los taninos condensados destacan por su alta capacidad antioxidante, atribuida a su abundancia de grupos hidroxilo y a su habilidad para quelar iones metálicos prooxidantes, evitando así la formación de radicales libres (Barman y Mishra, 2025; Machado et al., 2025). Además, se les atribuyen propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias, antimutagénicas y cardioprotectoras, que refuerzan el potencial nutracéutico de los frutos que los contienen (Coyago-Cruz et al., 2025; Dhara et al., 2025).

En el ámbito industrial y alimentario, los taninos poseen interés como antioxidantes naturales y agentes conservantes, ya que retrasan la oxidación lipídica y la degradación de pigmentos en productos vegetales procesados (Amorim et al., 2025). No obstante, su empleo debe considerarse con precaución, pues altas concentraciones pueden reducir la biodisponibilidad de proteínas y minerales mediante la formación de complejos insolubles, efecto que ha sido documentado en diversas matrices vegetales (Lima et al., 2025; Machado et al., 2025).

Antocianinas

Las antocianinas son pigmentos hidrosolubles pertenecientes a la familia de los flavonoides, responsables de las tonalidades rojas, moradas y azules en numerosos frutos (Escobar-Barranco et al., 2025). Derivan de la antocianidina, un núcleo flavílico que puede unirse a azúcares o ácidos orgánicos, lo que determina su color, estabilidad y solubilidad (Niu et al., 2025). Estas moléculas cumplen funciones ecológicas esenciales, como la atracción de polinizadores y dispersores, además de ofrecer protección frente al estrés foto-oxidativo (Amorim et al., 2025; J. Zhang et al., 2025).

El contenido de antocianinas varía considerablemente entre especies y estados de maduración. En frutos de *Psidium cattleianum* y *Campomanesia phaea*, el incremento de estos pigmentos se asocia con la transición de colores verdes a rojizos o violáceos y con un aumento paralelo de la capacidad antioxidante (Lima et al., 2025; Machado et al., 2025). En especies tropicales como la pitahaya roja (*Hylocereus polyrhizus*), la acumulación de antocianinas durante la maduración está regulada por la expresión de genes estructurales de la vía de los flavonoides, incluyendo PAL, CHS, CHI, DFR y ANS (Erazo-Lara et al., 2024; Niu et al., 2025).

En el cerezo del Himalaya (*Prunus jenkinsii*), se ha documentado la presencia de antocianinas aciladas con alta estabilidad térmica y frente a variaciones de pH, característica que las hace atractivas para la industria alimentaria como colorantes naturales (Rymbai et al., 2024; Stabnikova et al., 2024). De manera similar, especies del género *Vaccinium*, como *V. floribundum* y *V. meridionale*, presentan perfiles complejos de delphinidina y cianidina con elevada capacidad antioxidante (Escobar-Barranco et al., 2025).

Desde el punto de vista funcional, las antocianinas poseen una alta capacidad para donar electrones y átomos de hidrógeno, quelar metales de transición y modular enzimas antioxidantes, contribuyendo así a la reducción del estrés oxidativo (Barman y Mishra, 2025). Además, se ha relacionado su consumo con efectos antiinflamatorios, antidiabéticos, antimutagénicos y cardioprotectores, lo

que las posiciona como compuestos bioactivos de gran relevancia nutracéutica (Dhara et al., 2025; Stabnikova et al., 2024).

Carotenoides

Los carotenoides son pigmentos liposolubles de naturaleza terpenoide (C_{40}), responsables de las coloraciones amarillas, anaranjadas y rojizas en numerosos frutos tropicales y subtropicales. Se clasifican en dos grupos principales: los carotenos (como el β -caroteno y el licopeno), constituidos únicamente por carbono e hidrógeno, y las xantofilas (como la luteína y la zeaxantina), que contienen oxígeno en su estructura. Además de conferir coloración, desempeñan funciones fisiológicas esenciales como la foto-protección, la atenuación del estrés oxidativo y la participación en la biosíntesis de hormonas vegetales, como el ácido abscísico (Lima et al., 2025; Souto et al., 2025).

Desde el punto de vista nutricional, los carotenoides son compuestos bioactivos de alto interés por su capacidad antioxidante y su papel como precursores de la vitamina A. En el organismo humano contribuyen a la neutralización de especies reactivas de oxígeno, la prevención de enfermedades degenerativas y la protección ocular, especialmente la luteína y la zeaxantina que se acumulan en la retina (P. B. Santos et al., 2025; Souto et al., 2025).

Diversos frutos tropicales destacan por su riqueza en carotenoides. El aceite de burití (*Mauritia flexuosa*) presenta contenidos elevados de β -caroteno y alta bioaccesibilidad, mientras que el aceite de acuri (*Attalea phalerata*) alcanza altas tasas de recuperación tras la digestión *in vitro*, lo que los posiciona como importantes fuentes naturales de provitamina A y antioxidantes lipofílicos (Souto et al., 2025). De manera similar, el cambuci (*Campomanesia phaea*), un fruto de la familia Myrtaceae, contiene carotenoides y polifenoles como compuestos bioactivos predominantes, que explican su notable capacidad antioxidante y antiinflamatoria (Lima et al., 2025). En especies de la misma familia, como el cambucá (*Plinia edulis*), se ha demostrado la presencia de carotenoides y fenoles en la pulpa, con actividades biológicas específicas, incluyendo efectos

gastroprotectores y quimiopreventivos, lo que refuerza su potencial como alimento funcional y recurso biocultural (Pazzini et al., 2025). Por su parte, *Anacardium humile* presenta cantidades apreciables de carotenoides y vitamina C, además de elevada capacidad antioxidante, especialmente en los frutos de epicarpio rojo (P. B. Santos et al., 2025).

Vitamina C (ácido ascórbico)

La vitamina C o ácido ascórbico es un compuesto esencial en la calidad nutricional y funcional de las frutas. Actúa como antioxidante primario y cofactor enzimático, participando en la neutralización de especies reactivas de oxígeno y en la regeneración de otros antioxidantes naturales, lo que contribuye al mantenimiento del equilibrio redox y a la protección celular frente al estrés oxidativo (Lima et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025).

El contenido de vitamina C varía ampliamente entre especies y está influido por factores genéticos, ambientales y fisiológicos, además del grado de madurez y las condiciones poscosecha. En el *Anacardium humile* (cajuzinho-do-cerrado), se ha reportado una alta concentración de ácido ascórbico, lo que contribuye significativamente a su elevada capacidad antioxidante, especialmente en los frutos de epicarpio rojo (P. B. Santos et al., 2025). De forma similar, el cambuci (*Campomanesia phaea*) se caracteriza por su riqueza en ácido ascórbico, que potencia su capacidad antioxidante y antiinflamatoria, reforzando su potencial como alimento funcional y fuente natural de compuestos bioactivos (Lima et al., 2025).

Estudios en otras especies confirman el papel central de la vitamina C en la calidad funcional de los frutos. Por ejemplo, en el burití (*Mauritia flexuosa*) y el acuri (*Attalea phalerata*), se ha observado una fuerte capacidad antioxidante vinculada a compuestos lipofílicos como carotenoides y tocoferoles, junto con la presencia de antioxidantes hidrosolubles como la vitamina C, que refuerzan su estabilidad oxidativa y valor nutracéutico (Souto et al., 2025). En el cambucá (*Plinia edulis*), la presencia de carotenoides y vitamina C en la pulpa también ha

sido relacionada con actividades biológicas protectoras, como efectos gastroprotectores y quimiopreventivos (Pazzini et al., 2025).

La vitamina C contribuye significativamente a la capacidad antioxidante global de las frutas, actuando de manera complementaria con otros compuestos bioactivos como los fenoles, flavonoides y carotenoides. Esta interacción refuerza la capacidad de los frutos para neutralizar especies reactivas de oxígeno y mantener su valor nutricional durante el consumo y procesamiento (Lima et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025; Souto et al., 2025).

2.4 Capacidad antioxidante y su evaluación

La capacidad antioxidante de los frutos nativos, silvestres y subutilizados es un indicador clave de su valor funcional y nutracéutico. Esta capacidad está directamente relacionada con la presencia de compuestos bioactivos como fenoles, flavonoides, taninos, carotenoides, vitamina C y otros metabolitos secundarios, los cuales actúan en conjunto para reducir la oxidación y contribuir a la protección celular (Lima et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025; Souto et al., 2025).

En el ámbito fisiológico, los antioxidantes desempeñan un papel fundamental en la modulación del estrés oxidativo, proceso implicado en el envejecimiento y en el desarrollo de enfermedades crónicas no transmisibles como cáncer, diabetes, enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (P. Zhang et al., 2020). Por esta razón, el estudio de la capacidad antioxidante en frutos ha adquirido creciente relevancia en las últimas décadas, no solo desde la perspectiva alimentaria, sino también como base para el desarrollo de ingredientes funcionales y suplementos naturales (Rahaman et al., 2023).

2.5 Métodos de evaluación de la capacidad antioxidante

La evaluación de la capacidad antioxidante en frutos tropicales, nativos y subutilizados se realiza principalmente mediante métodos *in vitro*, que permiten estimar la capacidad de los extractos para neutralizar radicales libres o reducir

agentes oxidantes. Entre los ensayos más utilizados en los estudios revisados se encuentran DPPH, ABTS y FRAP, que se distinguen por el tipo de radical evaluado y por su mecanismo de acción, ya sea de transferencia de electrones (SET) o de transferencia de átomos de hidrógeno (HAT) (Bhandari et al., 2025; Coyago-Cruz et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025; Souto et al., 2025).

El ensayo DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) es uno de los más aplicados en la determinación del poder antioxidante de frutas silvestres. Se basa en la reducción del radical DPPH•, a su forma no radical DPPH-H, decolorada, cuando interactúa con un compuesto antioxidante capaz de donar electrones o átomos de hidrógeno (Gulcin y Alwasel, 2023). Este método se caracteriza por su simplicidad, rapidez y bajo costo, y ha demostrado correlacionarse positivamente con el contenido de compuestos fenólicos y flavonoides totales. En *Anacardium humile*, los frutos de epicarpio rojo presentaron una actividad DPPH significativamente superior respecto a los de epicarpio amarillo, atribuida a su mayor contenido de ácido ascórbico, fenoles totales y flavonoides (P. B. Santos et al., 2025). De manera similar, Bhandari et al. (2025) reportaron valores elevados de inhibición del radical DPPH en jugos frescos y fermentados de frutos silvestres nepalíes, destacando una correlación estrecha entre la capacidad antioxidante y los contenidos de fenoles, flavonoides y antocianinas.

El método ABTS (2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)) evalúa la capacidad del extracto para neutralizar el radical catiónico ABTS•+, generado químicamente por oxidación con persulfato de potasio. Este ensayo presenta la ventaja de ser aplicable tanto en medios acuosos como orgánicos, permitiendo cuantificar antioxidantes polares y no polares, lo que lo hace más representativo para matrices vegetales complejas como los frutos (Cano et al., 2023). En el estudio de Coyago-Cruz et al. (2025), el ABTS fue utilizado junto con DPPH para caracterizar la capacidad antioxidante de *Lacmellea oblongata*, *Pourouma cecropiifolia* y *Euterpe precatoria*. Los resultados demostraron una fuerte correlación entre la capacidad antioxidante y la concentración de compuestos fenólicos totales, así como con los ácidos orgánicos presentes en los extractos.

Asimismo, Lima et al. (2025) reportaron que los extractos de *Campomanesia phaea* exhiben una elevada capacidad de neutralización del radical ABTS•+, asociada con su contenido de polifenoles, vitamina C y carotenoides.

Por su parte, el método FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) evalúa la capacidad reductora de los antioxidantes mediante la conversión del ion férrico (Fe^{3+}) en ferroso (Fe^{2+}) en presencia del reactivo TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil)-1,3,5-triazina). Este ensayo se basa en un mecanismo de transferencia de electrones y es considerado un buen indicador del poder reductor de compuestos fenólicos, flavonoides y ácido ascórbico (Heckmann et al., 2024).

En el estudio de *Anacardium humile*, reportado por P. B. Santos et al., (2025), el ensayo FRAP mostró resultados similares con los obtenidos por DPPH, confirmando que los frutos de epicarpio rojo poseen una mayor capacidad reductora, estrechamente relacionada con su concentración de antioxidantes naturales. Por otro lado, Souto et al. (2025) aplicaron este método en aceites de *Mauritia flexuosa* y *Attalea phalerata*, encontrando una alta capacidad reductora en correlación con la presencia de carotenoides y tocoferoles, lo que demuestra que el FRAP también puede aplicarse con éxito a matrices lipídicas.

2.6 Factores que afectan la capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante de los frutos depende estrechamente de su composición química, del perfil de compuestos bioactivos y de las condiciones fisiológicas y ambientales que influyen en su biosíntesis (Gadelha et al., 2024; Lima et al., 2025). En general, las frutas silvestres y subutilizadas presentan valores de capacidad antioxidante más elevados que las especies cultivadas, atribuible a su mayor contenido de fenoles, flavonoides, antocianinas y vitamina C (Coyago-Cruz et al., 2025; Uaila et al., 2024).

Durante la maduración, la capacidad antioxidante puede aumentar o disminuir según el equilibrio entre la síntesis de compuestos fenólicos y la degradación oxidativa de metabolitos sensibles. En especies como el guabijú (*Myrcianthes pungens*) y el araçá rojo (*Psidium cattleianum*), se observa un incremento

progresivo de la capacidad antioxidante a medida que madura, asociado al máximo contenido de antocianinas y flavonoides (de Oliveira Raphaelli, Guerra, et al., 2024; Machado et al., 2023). En cambio, en el cerezo del Himalaya (*Prunus jenkinsii*), la capacidad antioxidante total disminuye en los estadios sobremaduros, debido a la oxidación y degradación de compuestos fenólicos (Rymbai et al., 2024).

Las condiciones ambientales ejercen una influencia determinante en la producción de metabolitos antioxidantes. Factores como la exposición solar, la altitud, el estrés hídrico, la temperatura y la fertilidad del suelo modulan la expresión de enzimas clave de las rutas fenólicas. En el mango (*Mangifera indica*), el estrés hídrico moderado promueve la acumulación de flavonoides y carotenoides, lo que se traduce en una mayor capacidad antioxidante (Asghar et al., 2024). Este efecto se asocia a mecanismos de defensa foto-oxidativa activados bajo condiciones de estrés controlado.

El procesamiento y almacenamiento también determinan la estabilidad de los antioxidantes. Métodos como el secado, la molienda o la pasteurización pueden reducir la capacidad antioxidante entre 30 y 50 %, principalmente por oxidación térmica o desnaturalización de compuestos fenólicos y vitaminas (Dhara et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025). No obstante, ciertos tratamientos térmicos moderados y controlados pueden aumentar la biodisponibilidad de moléculas antioxidantes, como el licopeno y los ácidos fenólicos, al promover la liberación de formas conjugadas o glicosiladas (Wan et al., 2025).

2.7 Potencial nutracéutico y funcional de las frutas silvestres y subutilizadas

El concepto de nutracéutico se aplica a aquellos alimentos o compuestos que, además de aportar nutrientes esenciales, proporcionan beneficios fisiológicos adicionales o ayudan a reducir el riesgo de enfermedades (Barman y Mishra, 2025). El creciente interés por las frutas silvestres, nativas y subutilizadas se sustenta en su elevado contenido de compuestos bioactivos con potencial

nutracéutico y funcional. Estas especies representan alternativas sostenibles para diversificar la dieta, fortalecer la seguridad alimentaria y contribuir a la prevención de enfermedades crónicas asociadas al estrés oxidativo (Coyago-Cruz et al., 2025; Wan et al., 2025). En las últimas décadas, múltiples investigaciones han evidenciado su papel como fuentes naturales de antioxidantes, vitaminas, minerales, fibra dietética y metabolitos secundarios con efectos benéficos sobre la salud humana (Dhara et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025).

Diversas especies tropicales y subtropicales han sido estudiadas por su potencial nutracéutico y funcional. Por ejemplo, el carambolo (*Averrhoa carambola*), una fruta tropical, ha ganado atención debido a su rico contenido de vitaminas, minerales y fitoquímicos, que incluyen una variedad de compuestos fenólicos como flavonoides, ácidos fenólicos y antocianidinas (Dhara et al., 2025). Así mismo, la guayaba (*Psidium guajava*) es reconocida por su perfil nutricional, rico en fibra, vitaminas y minerales esenciales, y por sus diversos compuestos bioactivos con potencial farmacológico (Balkıç et al., 2024).

Los extractos fenólicos de especies como la gabirola (*Campomanesia cambessedesiana*), el araçá rojo (*Psidium cattleianum*), el guabijú (*Myrcianthes pungens*) y la jabuticaba (*Plinia cauliflora*) han mostrado efectos antiproliferativos frente a líneas celulares cancerígenas, asociados a su alto contenido de antocianinas y flavonoides (de Oliveira Raphaelli, Camargo, et al., 2024; Lima et al., 2025). De igual manera, frutos africanos como el baobab (*Adansonia digitata*) y el marula (*Sclerocarya birrea*) se destacan por su riqueza en fenoles, fibra y vitamina C, constituyéndose en recursos valiosos para combatir la desnutrición y fortalecer la resiliencia alimentaria en comunidades rurales (Lekhuleni et al., 2024; Uaila et al., 2024).

El consumo habitual de estas frutas o de sus derivados puede contribuir a modular el metabolismo lipídico y glucídico, reducir el colesterol LDL, mejorar la respuesta inmunológica y proteger el sistema cardiovascular (Bhandari et al., 2025; Stabnikova et al., 2024). En particular, los extractos de amla (*Phyllanthus*

emblica) y agracejo (*Berberis asiatica*) han demostrado efectos hipoglucémicos y antihiperlipidémicos en modelos animales, lo que evidencia su potencial como agentes antidiabéticos naturales (Bhandari et al., 2025). Por otra parte, las antocianinas y taninos condensados actúan como moduladores del microbioma intestinal, favoreciendo el crecimiento de bacterias benéficas y la producción de ácidos grasos de cadena corta, compuestos esenciales para la salud intestinal y la homeostasis metabólica (Dhara et al., 2025; Wan et al., 2025).

Más allá de su valor fisiológico, estas frutas poseen una relevancia sociocultural y económica significativa. Su aprovechamiento fomenta la conservación del conocimiento tradicional, la diversificación productiva y el fortalecimiento de economías rurales (Coyago-Cruz et al., 2025; Nitisuk et al., 2025). La revalorización de especies subutilizadas impulsa el desarrollo de cadenas agroindustriales sostenibles y contribuye a la soberanía alimentaria, especialmente en regiones donde estos frutos forman parte del patrimonio biocultural (Gadelha et al., 2024; Sousa Silva et al., 2026).

2.8 Importancia etnobotánica y relevancia cultural

Los frutos nativos y subutilizados constituyen un componente esencial del patrimonio etnobotánico y cultural de numerosas regiones del mundo. Además de ser una fuente relevante de recursos alimentarios y medicinales para las comunidades locales, su recolección, conservación, procesamiento y uso terapéutico están asociados a conocimientos tradicionales transmitidos de generación en generación. Estos conocimientos son un eje central en la configuración de sistemas alimentarios sostenibles y en la preservación de la diversidad (Estrada-Castillón et al., 2022).

En la región del Himalaya, las frutas silvestres desempeñan un papel integral en la dieta y medicina tradicional de las comunidades indígenas. Barman y Mishra (2025) documentaron el uso etnobotánico de especies como *Diospyros lotus*, *Elaeagnus umbellata*, *Gaultheria fragrantissima*, *Gaultheria trichophylla*, *Pyrus pashia*, *Rubus niveus* y *Vaccinium glaucoalbum*, valoradas por su abundancia en

fitoquímicos antioxidantes y su función en la promoción de una alimentación equilibrada y saludable. Así mismo, Angami et al. (2024) registraron 44 especies de frutos silvestres comestibles en el noreste de la India, destacando a *Elaeagnus umbellata* por su alto contenido de sólidos solubles y vitamina A, y a *Terminalia chebula* como fuente de azúcares reductores y flavonoides. Estos estudios evidencian que la preservación del conocimiento etnobotánico constituye una herramienta estratégica para reforzar la seguridad nutricional y la soberanía alimentaria en comunidades rurales.

En América Latina, particularmente en el Brasil tropical y subtropical, los frutos nativos del Cerrado y la Amazonía representan símbolos del patrimonio biocultural, con importancia tanto alimentaria como socioeconómica. Pazzini et al. (2025) destacaron al cambucá (*Plinia edulis*) como una especie emblemática en riesgo de erosión genética, cuyo estudio se ha centrado en las hojas por su contenido de terpenoides y compuestos fenólicos con actividad gastroprotectora, antiinflamatoria y antimicrobiana. Sin embargo, el fruto ha demostrado ser fuente relevante de fibras dietéticas, minerales y compuestos volátiles, con un perfil sensorial distintivo. Los autores subrayan que el desarrollo de cadenas agroproductivas sostenibles requiere comprender su potencial agrotecnológico y promover su uso integral como alimento funcional.

El cambuci (*Campomanesia phaea*), también nativo de Brasil, es otro ejemplo de un fruto con alto valor cultural y nutracéutico. Lima et al. (2025) reportaron cantidades significativas de ácido ascórbico, flavonoides y proantocianidinas, compuestos responsables de su elevada capacidad antioxidante, actividad antiinflamatoria y potencial inmunoprotector. A pesar de su valor, la especie se considera subutilizada y amenazada por la deforestación, por lo que su conservación y aprovechamiento sostenible resultan prioritarios.

Desde una perspectiva global, la etnobotánica aplicada reconoce que el rescate de especies subutilizadas no solo fortalece la diversificación alimentaria, sino que también estimula la innovación local y la equidad económica. Marappan et al. (2025) enfatizan que estos frutos, por su calidad nutricional y contenido de

compuestos bioactivos, pueden desempeñar un papel clave en la reducción de la pobreza y la mejora de la seguridad alimentaria, siempre que existan políticas de investigación y extensión agrícola orientadas a su valorización y comercialización responsable.

Sin embargo, persisten asimetrías en la documentación y valorización del conocimiento tradicional. Mientras especies ampliamente estudiadas, como el mango (*Mangifera indica*) o la guayaba (*Psidium guajava*), han alcanzado relevancia comercial, muchas variedades locales permanecen marginadas. Gonçalves et al. (2024) demostraron que variedades regionales de aguacate cultivados en Madeira exhiben niveles más altos de compuestos antioxidantes y lípidos saludables que la variedad comercial *Hass*, destacando el potencial de recursos genéticos locales con ventajas nutricionales subestimadas.

En el contexto asiático, la wampí (*Clausena lansium*) constituye otro ejemplo de fruto con valor cultural y potencial industrial. Ding et al. (2025) sintetizaron los estudios disponibles sobre su composición fitoquímica y bioactividad, resaltando su riqueza en flavonoides, ácidos fenólicos, alcaloides, polisacáridos y aceites esenciales con efectos antioxidantes, hipoglucémicos y antiinflamatorios. Los autores subrayan la necesidad de integrar el conocimiento tradicional con la investigación científica moderna para aprovechar plenamente su potencial funcional y nutracéutico, así como para diversificar su uso en la industria alimentaria y farmacéutica.

2.9 Uso de frutas nativas y subutilizadas en la obtención de bebidas fermentadas

El aprovechamiento de frutas nativas, silvestres y subutilizadas en la elaboración de bebidas fermentadas representa una alternativa biotecnológica sostenible que combina la valorización agroindustrial, la preservación cultural y la innovación en alimentos funcionales. Estas bebidas no solo constituyen expresiones del patrimonio gastronómico regional, sino también vehículos para el aprovechamiento de compuestos bioactivos presentes en los frutos, como

polifenoles, antocianinas y ácidos orgánicos, que pueden conservarse o incluso potenciarse durante el proceso fermentativo (Cavanholi et al., 2025; Machado et al., 2025).

Durante la fermentación, los microorganismos, principalmente levaduras del género *Saccharomyces* y bacterias lácticas, transforman los azúcares simples en etanol y dióxido de carbono, generando simultáneamente una compleja matriz de metabolitos secundarios (ésteres, alcoholes superiores, ácidos volátiles y compuestos fenólicos modificados) que contribuyen al aroma, sabor y propiedades antioxidantes del producto final (Bhandari et al., 2025). El tipo de sustrato, las condiciones de fermentación y la microflora endógena determinan la composición química y funcional de la bebida.

Cavanholi et al. (2025) reportaron que la fermentación de frutos de arazá rojo (*Psidium cattleianum*) incrementa significativamente el contenido de cianidina-3-glucósido y mejora la capacidad antioxidante total. Esta acumulación diferencial sugiere que los procesos fermentativos pueden potenciar la extracción y estabilidad de antocianinas, incrementando su bioaccesibilidad (Monteiro et al., 2025). De manera similar, Wanderley et al. (2024) encontraron que la fermentación modificó el perfil tánico y mejoró propiedades antioxidantes en jaboticaba (*Plinia trunciflora*), evidenciando el potencial de procesos biotecnológicos para valorizar frutos nativos brasileños. Por otra parte, Bhandari et al., (2025) demostraron que los jugos fermentados de agracejo (*Berberis asiatica*) y amla (*Phyllanthus emblica*) presentan mayor capacidad antioxidante y contenido de flavonoides en comparación con los jugos sin fermentar, lo que sugiere que la fermentación puede potenciar la funcionalidad nutracéutica de las bebidas tradicionales elaboradas con frutas ricas en compuestos fenólicos.

El interés científico y tecnológico en estas bebidas radica no solo en su valor cultural, sino también en su potencial como fuentes de antioxidantes naturales y prebióticos, con aplicaciones emergentes en la industria alimentaria y farmacéutica. En muchos casos, las bebidas fermentadas tradicionales derivadas de frutos nativos, como los vinos artesanales, sidras o fermentados mixtos,

mantienen microorganismos beneficiosos que pueden contribuir a la salud intestinal y al reforzamiento del sistema inmunológico (Feng y Wang, 2020; Lugo et al., 2021).

Desde una perspectiva cultural, la producción artesanal de fermentados frutales refleja una continuidad de saberes tradicionales en comunidades rurales y pueblos originarios, donde la fermentación ha sido empleada históricamente como estrategia de conservación de alimentos y valorización de la biodiversidad local (Maldonado García, 2021). Sin embargo, Marappan et al. (2025) indican que frutos subutilizados permanecen relegados a mercados de nicho debido a sistemas de comercialización subdesarrollados y falta de estandarización, limitando su potencial de escalamiento comercial.

2.10 Perspectivas para la investigación y el aprovechamiento sostenible

El estudio de las frutas silvestres, nativas y subutilizadas ha adquirido una creciente relevancia en los últimos años debido a su potencial para mejorar la seguridad nutricional y promover la conservación de la biodiversidad, así como para diversificar los sistemas alimentarios mediante el desarrollo de productos funcionales y nutraceuticos (Fatima et al., 2025; Lima et al., 2025). No obstante, la mayoría de estas especies continúa siendo escasamente documentada en lo referente a su composición química, propiedades funcionales, biología reproductiva y potencial agroindustrial (Sousa Silva et al., 2026; Uaila et al., 2024). En este contexto, se vuelve esencial fortalecer la investigación interdisciplinaria que articule la etnobotánica, la fisiología vegetal, la ciencia de los alimentos y la biotecnología, con el propósito de promover un aprovechamiento integral y sostenible de los recursos nativos.

Una de las principales limitaciones para su valorización es la falta de estandarización metodológica en los estudios de caracterización fisicoquímica, evaluación antioxidante y análisis nutraceutico. La heterogeneidad de los enfoques dificulta la comparación de resultados y la identificación de especies con alto potencial funcional (Dhara et al., 2025; Machado et al., 2025). Por tanto,

es prioritario desarrollar protocolos analíticos uniformes y reproducibles, que incluyan la cuantificación precisa de metabolitos bioactivos y la evaluación de su biodisponibilidad y bioaccesibilidad, para comprender mejor su comportamiento y eficacia en el organismo humano (Stabnikova et al., 2024; Wan et al., 2025). El conocimiento actual sobre las interacciones sinérgicas entre los compuestos bioactivos de las frutas aún es limitado. La combinación de polifenoles, carotenoides, taninos y vitamina C puede modificar significativamente la capacidad antioxidante y las propiedades fisiológicas de los frutos (Bhandari et al., 2025; P. B. Santos et al., 2025).

Desde una perspectiva productiva, la domesticación y el cultivo controlado de especies silvestres con alto valor nutricional y funcional representan tanto un reto científico como una oportunidad agrícola. La selección de genotipos con características deseables como mayor rendimiento, resistencia a plagas, calidad sensorial y estabilidad poscosecha, podría facilitar su incorporación en sistemas agroforestales sostenibles (Fischer et al., 2024; Gadelha et al., 2024). De igual manera, el desarrollo de tecnologías poscosecha adecuadas (secado controlado, liofilización, microencapsulación) favorecería la conservación de la calidad nutricional, la extensión de la vida útil y la inserción de estas frutas en cadenas agroindustriales (Low y Chong, 2024; Sousa Silva et al., 2026).

En el plano socioambiental, el aprovechamiento de los frutos silvestres debe sustentarse en principios de conservación biocultural y soberanía alimentaria, reconociendo el papel de las comunidades locales como guardianas del conocimiento tradicional y gestoras de la biodiversidad (Coyago-Cruz et al., 2025; Nitisuk et al., 2025). Las estrategias de valorización deben promover modelos de economía solidaria que garanticen beneficios directos para recolectores y productores, fomenten la reforestación de especies nativas y eviten su sobreexplotación (Lekhuleni et al., 2024; Uaila et al., 2024).

La investigación en este campo deberá profundizar en la caracterización fitoquímica y funcional de especies poco estudiadas, así como en la evaluación *in vitro* e *in vivo* de sus extractos y compuestos aislados. Asimismo, será clave

impulsar el desarrollo de productos funcionales innovadores que conserven la identidad biocultural de los frutos nativos y promuevan su inclusión en los mercados locales y globales. Paralelamente, deben fortalecerse los programas de conservación y domesticación participativa, integrando el conocimiento científico con el saber tradicional comunitario. El fortalecimiento de estas líneas de acción permitirá aprovechar de manera integral el potencial de las frutas silvestres como recursos alimentarios y nutraceuticos, contribuyendo a un modelo de alimentación sostenible, resiliente y culturalmente pertinente, que favorezca tanto la salud humana como la preservación de la biodiversidad tropical (Martínez-Navarrete et al., 2008; Rodríguez León y Quevedo Olaya, 2024).

2.11 Literatura citada

- Amorim, T. A., Carvalho, A. J. de B. A., da Silva Figueiredo, L., Lima, M. D. S., Sarinho, A. M., Santos, N. C., Lisboa, H. M., Souza Gusmão, T. A., y Gusmão, R. P. (2025). Structure-function relationship and antioxidant mechanisms of pectin from red and white pitaya peels for functional food applications. *Food Hydrocolloids*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111455>
- Angami, T., Wangchu, L., Debnath, P., Sarma, P., Singh, B., Singh, A. K., Hazarika, B. N., Singh, M. C., Touthang, L., Lungmuana, y Ayyanar, M. (2024). Exploring the nutritional potential and anti-nutritional components of wild edible fruits of the eastern Himalayas. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(1), 150–167. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02147-5>
- Asghar, Z., Amin, M. Z., Ullah, S., Hassan, H., Habiba, U. E., Razzaq, K., Rajwana, I. A., Akhtar, G., Faried, H. N., Aiyub, M., Nayab, S., Naz, A., Lukas, S. B., Simsek, O. Ö., Izgu, T., Masood, H. A., Almutairi, K. F., Ayman, E. S., Khashaba, R. A., y Mirmazloum, I. (2024). Antioxidative enzymes, phytochemicals and proximate components in jujube fruit (*Ziziphus mauritiana* L.) with respect to genotypes and harvest maturity. *Food Bioscience*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.104504>
- Balkıç, R., Balci-Torun, F., Gungor, K. K., Guler, G., y Gübbük, H. (2024). Physical and chemical characterization of guava (*Psidium guajava* L.) genotypes grown in subtropical condition. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(2). <https://doi.org/10.15835/nbha52213353>
- Barman, M., y Mishra, P. (2025). Comprehensive review on ethnobotanical, nutritional and functional properties of wild edible fruits of North Eastern Himalaya, India. *Journal of Food Science and Technology*, 62(8), 1407–1424. <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06351-7>

- Bautista-Valle, M. V., Camacho-Vázquez, C., Elizalde-Contreras, J. M., Monribot-Villanueva, J. L., Limón, A. M. V., Bojórquez-Velázquez, E., Zamora-Briseño, J. A., Jorrín-Novio, J. V., y Ruíz-May, E. (2024). Comparing and integrating TMT-SPS-MS3 and label-free quantitative approaches for proteomics scrutiny in recalcitrant mango (*Mangifera indica* L.) peel tissue during postharvest period. *Proteomics*, 24(5). <https://doi.org/10.1002/pmic.202300239>
- Bhandari, R., Achhami, H., Pachhai, B. B., Chaudhary, S., Pant, S. P., y Bhatt, L. R. (2025). Physicochemical, proximate composition, and antioxidant activity of fresh and fermented juices of selected wild edible fruits from the Gulmi District, western Nepal. *LWT*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118307>
- Cano, A., Maestre, A. B., Hernández-Ruiz, J., y Arnao, M. B. (2023). ABTS/TAC methodology: Main milestones and recent applications. *Processes*, 11(1), 185. <https://doi.org/10.3390/pr11010185>
- Carlos de Sousa, W., Alves Moraes, R., y Damian Giraldo Zuniga, A. (2024). Buriti (*Mauritia flexuosa*) shell flour: Nutritional composition, chemical profile, and antioxidant potential as a strategy for valuing waste from native Brazilian fruits. *Food Research International*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114578>
- Cavanholi, M. G., Wanderley, B. R. D. S. M., Bredun, M. A., Louredo, F. J. C., Dos Santos, A. C., Costa, A. C. O., Burin, V. M., Amboni, R. D. D. M. C., y Fritzen-Freire, C. B. (2025). How do pH reduction and the addition of potassium metabisulfite impact color and the phenolic and anthocyanin profiles in red araçá (*Psidium cattleianum* Sabine) wine? *South African Journal of Botany*, 177, 251–263. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.12.005>
- Contreras, L., Isla, M. I., y Torres, S. (2025). Selection of novel starter lactic acid bacteria with probiotic potential native to chilto (*Solanum betaceum*) fruits. *Food Bioscience*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107200>
- Coyago-Cruz, E., Méndez, G. I., Escobar-Quíñonez, R., Cerna, M. F., y Heredia-Moya, J. (2025). *Lacmellea oblongata* and other undervalued Amazonian fruits as functional, antioxidant, and antimicrobial matrices. *Antioxidants*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/antiox14080924>
- da Cruz, O. N., da Costa Araújo, R., Sousa, S., da Silva, M. M., Henschel, J. M., y Batista, D. S. (2024). Physical and chemical characterization of fruits from autochthonous accessions of umbu trees (*Spondias tuberosa* Arr. Cam.) of the Brazilian northeast region. *Vegetos*. <https://doi.org/10.1007/s42535-024-01075-z>
- da Silva, D. L., Moraes, R. A., Sousa, H. M. S., Gualberto, L. D. S., Serra, G. R., y Martins, G. A. S. (2024). A comprehensive evaluation of chemical, bioactive profile, and antioxidant potential of gabioba (*Campomanesia cambessedesana*): An underexplored fruit from Brazil. *Current Nutrition and*

- Food Science*, 20(9), 1165–1176.
<https://doi.org/10.2174/1573401319666230719155449>
- da Silva, R. R., Leal, G. F., da Costa Gomes, C., de Oliveira, J. E. B., da Silva Soares, C. M., Morais, R. A., y Martins, G. A. S. (2025). Chemical characterization, antioxidant potential and phenolic profile of the pulp and by-products of black puçá (*Mouriri pusa*), a fruit from the Brazilian Cerrado region. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(1).
<https://doi.org/10.1007/s11130-024-01258-8>
- de Oliveira Raphaelli, C. O. O., Camargo, T. M., Radunz, M., Dos Santos Pereira, E., Concenço, F. I. G. D. R., Vizzotto, M., Rosa Zavareze, E. D., y Nora, L. (2024). *Eugenia pyriformis* Cambess (Myrtaceae): An unexplored Brazilian species with antimicrobial and antioxidant potential. *Current Nutrition and Food Science*, 20(6), 687–702.
<https://doi.org/10.2174/0115734013246333230927061119>
- de Oliveira Raphaelli, C. O. O., Guerra, D., Dos Santos Pereira, E., Vinholes, J. R., Camargo, T. M., Schwarz, S. F., da Silva, M. A., Vizzotto, M., Santos, F. N. dos, y Nora, L. (2024). Fruits, seeds and leaves of guabijuzeiro (*Myrcianthes pungens* (O. Berg) D. Legrand): Characteristics, uses and health benefits. *Journal of Food Science and Technology*, 61(6), 1035–1052. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05822-z>
- Dhara, J., Saha, S. K., Saha, P. S., y Chakraborty, R. (2025). Star fruit (*Averrhoa carambola*): Exploring its nutritional value, health benefits, and consideration for potential risk and future application in biotechnology and medicine. *Current Pharmacology Reports*, 11(1).
<https://doi.org/10.1007/s40495-024-00387-7>
- Ding, L., Liu, X., Fei, T., Lin, X., Hu, X., Wang, L., y Zhang, J. (2025). Chemical compositions, health benefits, safety assessment, and industrial applications of wampee (*Clausena lansium* (Lour.) Skeels): A comprehensive review. *Trends in Food Science and Technology*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.104922>
- Erazo-Lara, A. E., García-Pastor, M. E., Padilla-González, P. A., Valero, D., y Serrano-Mula, M. (2024). Preharvest elicitors as a tool to enhance bioactive compounds and quality of both peel and pulp of yellow pitahaya (*Selenicereus megalanthus* Haw.) at harvest and during postharvest storage. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(10).
<https://doi.org/10.3390/ijms25105435>
- Escobar-Barranco, N., Gil Archila, E., Villamil, R. A., y Bonilla, A. (2025). Chemical and nutritional value of Colombian Ericaceae with edible fruits. *Food Chemistry Advances*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101045>
- Estrada-Castillón, E., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Cuéllar-Rodríguez, L. G., March-Salas, M., Encina-Domínguez, J. A., Himmeslbach, W., Salinas-Rodríguez, M. M., Guerra, J., Coteria-Correa, M., Scott-Morales, L. M., Friesen, R. J., Garza-Zambrano, P., Arévalo-Sierra, J. R., Garate-

- Escamilla, H., Gutiérrez-Gutiérrez, M., y Gutiérrez-Santillán, T. V. (2022). Ethnobotany in Iturbide, Nuevo León: The traditional knowledge on plants used in the semiarid mountains of northeastern Mexico. *Sustainability*, 14(19), 12751. <https://doi.org/10.3390/su141912751>
- Fatima, S. K., Khan, R. T., Nazir, M., Manzoor, M. T., Gillani, S. W., Munir, M., Nasir, M., Akhtar, W., Ahmad, S., Binobead, M. A., y Ajmal Ali, M. (2025). Exploration of medicinal and nutritional value of Himalayan wild edible fruits: Implications for sustainable health and functional foods. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 72(8), 10071–10091. <https://doi.org/10.1007/s10722-025-02557-y>
- Feng, T., y Wang, J. (2020). Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: A systematic review. *Gut Microbes*, 12(1), 1801944. <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>
- Fischer, G., Parra-Coronado, A., Hernández, M. S., y Balaguera, H. E. (2024). Effect of preharvest conditions on the quality of important Myrtaceae fruits in Colombia: A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 18(3). <https://doi.org/10.17584/rcch.2024v18i3.18019>
- Gadelha, T. M., do Nascimento, A. M., da Silva, T. I., da Silva, J. L., Barros Sales, G. N., Ribeiro, W. S., de Queiroga, R. C. F., de Almeida, F. A., de Souza, P. A., Ribeiro, J. E. D. S., Nóbrega, J. S., Lima, G. S. de, Soares, L. A. dos A., y Costa, F. B. D. (2024). Comprehensive analysis of quality and bioactive compounds in umbu-cajá fruit during different ripening stages. *Scientia Horticulturae*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112886>
- Garcés-Moncayo, M. F., Guevara-Viejo, F., Valenzuela-Cobos, J. D., Galindo-Villardón, P., y Vicente-Galindo, P. (2025). Modeling of the physicochemical and nutritional composition of *Musa paradisiaca* (Williams variety) at different ripening stages in Ecuador. *Agriculture (Switzerland)*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/agriculture15101025>
- Ghag, S. S., Gokhale, J. S. S., y Lele, S. S. (2024). Shelf-life extension of cashew apples (*Anacardium occidentale*) by chemical pretreatment using dip and dry method. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18(3), 2306–2317. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02356-6>
- Gonçalves, D., Gouveia, C. S. S., Ferreira, M. J., Ganança, J. F. T., Pinto, D. C. G. A., y Pinheiro De Carvalho, M. A. A. (2024). Comparative analysis of antioxidant and fatty acid composition in avocado (*Persea americana* Mill.) fruits: Exploring regional and commercial varieties. *Food Chemistry*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.138403>
- Gulcin, İ., y Alwasel, S. H. (2023). DPPH radical scavenging assay. *Processes*, 11(8), 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>
- Heckmann, M., Stadlbauer, V., Drotarova, I., Gramatte, T., Feichtinger, M., Arnaut, V., Atzmüller, S., Schwarzing, B., Röhrl, C., Blank-Landeshammer, B., y Weghuber, J. (2024). Identification of oxidative-stress-reducing plant extracts from a novel extract library—Comparative analysis of cell-free and

- cell-based in vitro assays to quantitate antioxidant activity. *Antioxidants*, 13(3), 297. <https://doi.org/10.3390/antiox13030297>
- Herner, R. C., y Ketsa, S. (2025). Insight into the hardening of the pericarp of mangosteen fruit after impact. *Crop Science*, 65(3). <https://doi.org/10.1002/csc2.70071>
- Huang, P., Cheng, Y., Lu, W. C., Chiang, P., Yeh, J. L., Wang, C., Liang, Y., y Li, P. H. (2024). Changes in nutrient content and physicochemical properties of Cavendish bananas var. Pei Chiao during ripening. *Horticulturae*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040384>
- Jiménez, M. A. P., Daza, S. G., y Núñez, V. (2025). Structural and phylogenetic characterization of a polyphenol oxidase gene in lulo (*Solanum quitoense* Lam.); caracterización estructural y filogenética de un gen de polifenol oxidasa en lulo (*Solanum quitoense* Lam.). *Agronomía Colombiana*, 43(1). <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v43n1.118599>
- Ketsa, S., y Warrington, I. J. (2024). Anthocyanin physiology and biochemistry in fleshy fruit species: Mangosteen as a model. *Crop Science*, 64(4), 1987–2013. <https://doi.org/10.1002/csc2.21291>
- Lekhuleni, I. L. G., Shabalala, A. N., y Maluleke, M. K. (2024). Quality aspects of marula (*Sclerocarya birrea*) fruit, nutritional composition, and the formation of value-added products for human nutrition: A review. *Discover Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00108-5>
- Lima, A. A. S., Conceição, L. D. S., da Silva Cardoso, P., Teixeira, K. L., Cruz, R. D. C. M. D., y Otero, D. M. (2025). Nutritional and bioactive composition of *Campomanesia phaea* and its current technological applications. *Food and Humanity*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100783>
- Low, X. Y., y Chong, C. Y. (2024). Extraction of bioactive compounds from passion fruit waste and their potential applications in the food industry: A scoping review. *Food Research*, 8, 142–156. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.8\(S4\).7](https://doi.org/10.26656/fr.2017.8(S4).7)
- Lugo, L., Cruz-Cansino, N. D. S., Cervantes-Elizarrarás, A., Delgado-Olivares, L., Ariza-Ortega, J. A., y Zafra-Rojas, Q. Y. (2021). Bacterias ácido lácticas de bebidas vegetales fermentadas: Producción de metabolitos y propiedades antimicrobianas. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 9(18), 175–186. <https://doi.org/10.29057/icsa.v9i18.6590>
- Luo, X., Zhang, X., Xu, A., Yang, Y., Wang, Z., Ying, Y., Li, K., Xu, W., Cai, M., y Xu, P. (2025). Mechanistic insights into the anti-glioma effects of exosome-like nanoparticles derived from *Garcinia mangostana* L.: A metabolomics, network pharmacology, and experimental study. *International Journal of Nanomedicine*, 20, 5407–5427. <https://doi.org/10.2147/IJN.S514930>
- Machado, P. G., Londero, D. S., Barcia, M. T., y Ballus, C. A. (2023). Exploring anthocyanin and free and bound phenolic compounds from two

- morphotypes of araçá (*Psidium cattleianum* Sabine) by LC-ESI-QqQ-MS/MS. *Foods*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/foods12173230>
- Machado, P. G., Molina, F. S., Barcia, M. T., y Ballus, C. A. (2025). The Brazilian native fruits araçá, guabijú, and guabiroba: A brief and integrative review on their phenolic composition and analytical methods. *Foods*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/foods14162858>
- Maldonado García, J. (2021). Saberes tradicionales y transición agroecológica en la Mixteca Poblana. *Carta Económica Regional*, 0(128), 127–150. <https://doi.org/10.32870/cer.v0i128.7820>
- Marappan, K., Sadasivam, S., Natarajan, N., Arumugam, V. A., Lakshmaiah, K., Thangaraj, M., Giridhar Gopal, M., y Asokan, A. (2025). Underutilized fruit crops as a sustainable approach to enhancing nutritional security and promoting economic growth. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1618112>
- Martínez-Navarrete, N., Del Mar Camacho Vidal, M., y José Martínez Lahuerta, J. (2008). Los compuestos bioactivos de las frutas y sus efectos en la salud. *Actividad Dietética*, 12(2), 64–68. [https://doi.org/10.1016/S1138-0322\(08\)75623-2](https://doi.org/10.1016/S1138-0322(08)75623-2)
- Mohd Yusof, F. A., Azman, E. M., Noranizan, M., y Yusof, N. L. (2025). The influence of exogenous melatonin treatment on quality, nutritional profile, and antioxidant system of fresh-cut carambola during cold storage. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101704>
- Monteiro, S. S., Santos, N. C., Almeida, R. L. J., de Lima, T. L. B., Tome, A. E. S., Morais, S. K. Q., Dias, R. A. D. L., Paiva, Y. F., Martins, A. N. A., da Silva, L. A., Carvalho, R. D. O., André, A. M. M. C. N., Matias, J. G., de Oliveira Leite, M., Trindade Rocha, A. P., y Pasquali, M. A. B. (2025). Evaluation of sapodilla pulp as a matrix for probiotic fermentation: Physicochemical changes, antioxidant potential, and in vitro digestibility during storage. *International Journal of Food Microbiology*, 435. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111175>
- Ngurthankhumi, R., Hazarika, T. K., Zothanslama, y Lalruatsangi, E. (2024). Nutritional composition and anti-nutritional properties of wild edible fruits of northeast India. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101221>
- Nitisuk, P., Wanyo, P., Chamsai, T., y Charoenjit, K. (2025). Sustainable valorization of tropical fruit peels for sustainable production of natural antioxidants and functional food ingredients. *Sustainable Food Technology*, 3(4), 1189–1202. <https://doi.org/10.1039/d4fb00371c>
- Niu, X., Hu, Y., Wang, X., Li, R., Li, W., y Shao, Y. (2025). Glycine betaine and MiWRKY53 enhance antioxidant capacity and disease resistance against *Colletotrichum gloeosporioides* in mango fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2025.113464>

- Obregón, A. J., López-Belchí, M. D., y Angeles, D. (2024). Nutritional and bioactive properties of *Solanum quitoense* Lam: Native fruit from the South American Andes. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 13(4). <https://doi.org/10.55251/jmbfs.10386>
- Palomino-Hermosillo, Y. A., Díaz-Jasso, Á. E., Balois-Morales, R., Ochoa-Jiménez, V. A., Bautista-Rosales, P. U., y Berumen-Varela, G. (2024). Integrative analysis of transcriptome and phenolic compounds profile provides insights into the quality of soursop (*Annona muricata* L.) fruit. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 93(7), 1717–1732. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.052216>
- Pazzini, I. A. E., de Andrade, S. C., y Müller, C. M. O. (2025). Cambucá (*Plinia edulis* (Vell.) Sobral), a threatened Brazilian biocultural heritage: A pioneering review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(3). <https://doi.org/10.1007/s11130-025-01368-x>
- Rahaman, Md. M., Hossain, R., Herrera-Bravo, J., Islam, M. T., Atolani, O., Adeyemi, O. S., Owolodun, O. A., Kambizi, L., Daştan, S. D., Calina, D., y Sharifi-Rad, J. (2023). Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. *Food Science & Nutrition*, 11(4), 1657–1670. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3217>
- Rodríguez León, A., y Quevedo Olaya, J. L. (2024). Evolución de la alimentación humana: Un enfoque en la producción de alimentos y su impacto en la salud. *Revista Científica Pakamuros*, 12(4), 35–56. <https://doi.org/10.37787/xaw4zs39>
- Rymbai, H. H., Mawlein, J., Verma, V. K., Dutta, S. K., Hazarika, S. B., Ercisli, S., Mishra, V. K., y Sülüšoğlu Durul, M. (2024). Maturity stages modulate fruit quality, bioactive constituents, and antioxidant activity of *Prunus jenkinsii*. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71(4), 1541–1555. <https://doi.org/10.1007/s10722-023-01718-1>
- Rymbai, H. H., Ercisli, S., Sülüšoğlu Durul, M., Kiliçgün, H., Bayyigit, İ., y Çolak, A. M. (2025). Fruit biochemical, bioactive and antioxidant characteristics of *Prunus nepalensis*. *Applied Fruit Science*, 67(3). <https://doi.org/10.1007/s10341-025-01371-1>
- Santos, P. B., Fonseca, H. C., Siqueira, S. G., Oliveira, M. L. P., Fonseca, R. S., y de Lima, J. P. (2025). Physicochemical and antioxidant properties of *Anacardium humile* A. St.-Hil, an underexploited fruit from the Brazilian Cerrado. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(3). <https://doi.org/10.1007/s11130-025-01393-w>
- Santos, T. C., Fonseca, H. C., Durães, C. A. F., Fonseca, R. S., y de Lima, J. P. (2025). Physicochemical characterisation of a new Myrtaceae fruit native to Brazilian Cerrado. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53(5), 1496–1509. <https://doi.org/10.1080/01140671.2024.2373294>

- Shankar, K., Singh, S. R., Wangchu, L., Phurailatpam, A. K., Shantikumar, L., Mariam Anal, P. S., Devachandra, N., Hazarika, B. N., y Dolatabadian, A. (2025). Morphometric and biochemical analysis with seed protein profiling of *Passiflora* species found in the northeastern Himalayan region of India. *Horticulturae*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/horticulturae11060637>
- Sousa Silva, N. D., Santos Silva, G., Grisi, C. V. B., Vieira, V. B., Alves Dantas, C. E., Camêlo Guimarães, G. H., y Sucupira Maciel, M. I. (2026). Effect of yam starch coating with aroeira leaf extract on post-harvest quality preservation of ‘Tommy’ mangoes. *Food Control*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111659>
- Souto, R. N. M., Pinho, J. D. S., Peixe, C. L. D., Trindade, M. E. F., de Souza, P. G., da Silva, P. E., Teixeira-Costa, B. E., Castelo-Branco, V. N., y Teodoro, A. J. (2025). Buriti (*Mauritia flexuosa* L.f.) and Acuri (*Attalea phalerata* Mart. ex Spreng) oils as functional lipid sources in bakery products: Bioactive composition, sensory evaluation, and technological performance. *Foods*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/foods14173089>
- Stabnikova, O. V., Stabnikov, V. P., y Paredes-López, O. (2024). Fruits of wild-grown shrubs for health nutrition. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(1), 20–37. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01144-3>
- Uaila, E., Granfeldt, Y. E., Khan, M. A. M., Guiamba, I. R. F., Burleigh, S. H., y Lazarte, C. E. (2024). Variability of antioxidant compounds and capacities in four wild fruits collected in different years and locations in Mozambique. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101315>
- Vega, E. N., González-Zamorano, L., Cebadera, E., Barros, L., da Silveira, T. F., Vidal-Diez de Ulzurrun, G., Tardío, J., Lázaro, A., Cámara, M. M., Fernández-Ruiz, V., y Morales, P. (2025). Wild *Myrtus communis* L. fruit by-product as a promising source of a new natural food colourant: Optimization of the extraction process and chemical characterization. *Foods*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/foods14030520>
- Wan, C. (Craig), Langyan, S., Echeverría, J., Devkota, H. P., Tewari, D., Moosavi, M. A., Mohamed Ezzat, S. M., Perez-Vázquez, A., Fraga-Corral, M., Cravotto, G., Prieto, M. A., Belwal, T., y Li, M. (2025). Edible fruits and berries as a source of functional polyphenols: Current scene and future perspectives. *Phytochemistry Reviews*, 24(2), 1197–1225. <https://doi.org/10.1007/s11101-023-09892-x>
- Wanderley, B. R. D. S. M., de Lima, N. D., Turnes Pasini Deolindo, C., Kempka, A. P., Moroni, L. S., Gomes, V. V., Gonzaga, L. V., Costa, A. C. O., de Mello Castanho Amboni, R. D., Aquino, A. C. M. D. S., y Fritzen-Freire, C. B. (2024). Impact of pre-fermentative maceration techniques on the chemical characteristics, phenolic composition, in vitro bioaccessibility, and biological activities of alcoholic and acetic fermented products from jaboticaba (*Plinia trunciflora*). *Food Research International*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115246>

- Zhang, J., Phan, A. D. T., Netzel, M. E., Pengelly, A., Sivakumar, D., y Sultanbawa, Y. F. (2025). Exploring the functional food potential of edible *Persoonia* spp.: Nutritional composition, bioactive properties and phenolic metabolomics. *Food Chemistry*, 495. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146355>
- Zhang, P., Li, T., Wu, X., Nice, E. C., Huang, C., y Zhang, Y. (2020). Oxidative stress and diabetes: Antioxidative strategies. *Frontiers of Medicine*, 14(5), 583–600. <https://doi.org/10.1007/s11684-019-0729-1>

3 CAMBIOS EN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS, FISIOLÓGICAS Y ANTIOXIDANTES DE FRUTOS DE *Parathesis psychotrioides* DURANTE LA MADURACIÓN

Resumen

Los frutos nativos poseen un notable valor nutricional, funcional y cultural; sin embargo, su aprovechamiento y comercialización se ven limitados por la escasez de estudios científicos que respalden su potencial. Tal es el caso de *Parathesis psychotrioides*, una especie cuyos frutos presentan alto valor nutracéutico, pero marcada perecibilidad poscosecha. El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar los cambios fisicoquímicos, fisiológicos y antioxidantes durante la maduración de los frutos de *P. psychotrioides*, con el propósito de proponer estrategias de conservación y determinar los momentos óptimos de consumo según su potencial nutracéutico y grado de maduración. Se recolectaron frutos en seis estados de maduración y se registraron las variaciones en peso, tamaño, sólidos solubles totales, acidez titulable, concentración de azúcares y firmeza. Asimismo, se analizaron sus propiedades antioxidantes. El perfil de carbohidratos mostró concentraciones similares entre los azúcares totales y los azúcares reductores, lo que indica que estos últimos constituyen el tipo de carbohidratos predominante en el fruto. La elevada tasa de respiración promovió pérdidas significativas de peso fresco, identificándose como un factor limitante en la calidad poscosecha. El contenido de compuestos fenólicos y taninos condensados disminuyó a lo largo de la maduración, mientras que los flavonoides y las antocianinas incrementaron, influyendo directamente en la capacidad antioxidante. La capacidad antioxidante determinada mediante el ensayo de FRAP disminuyó significativamente y mostró correlación positiva con los taninos, mientras que la obtenida por el ensayo ABTS incrementó, asociándose con la acumulación de flavonoides y antocianinas. Estos resultados aportan información sobre la fisiología y comportamiento poscosecha de *P. psychotrioides* y contribuyen al diseño de estrategias de conservación y aprovechamiento de los frutos.

Palabras clave: maduración de frutos, fisiología vegetal, capacidad antioxidante, frutos silvestres tropicales, compuestos bioactivos, potencial nutracéutico.

CHANGES IN THE PHYSICOCHEMICAL, PHYSIOLOGICAL, AND ANTIOXIDANT CHARACTERISTICS OF *Parathesis* *psychotrioides* FRUIT DURING RIPENING

Abstract

Native fruits have remarkable nutritional, functional, and cultural value; however, their use and commercialization are limited by the scarcity of scientific studies supporting their potential. Such is the case of *Parathesis psychotrioides*, a species whose fruits have high nutraceutical value but marked post-harvest perishability. The objective of this study was to characterize the physicochemical, physiological, and antioxidant changes during the ripening of *P. psychotrioides* fruits, with the aim of proposing conservation strategies and determining the optimal times for consumption according to their nutraceutical potential and degree of ripeness. Fruits were collected at six stages of ripeness, and variations in weight, size, total soluble solids, titratable acidity, sugar concentration, and firmness were recorded. Their antioxidant properties were also analyzed. The carbohydrate profile showed similar concentrations between total sugars and reducing sugars, indicating that the latter are the predominant type of carbohydrate in the fruit. The high respiration rate promoted significant fresh weight losses, identified as a limiting factor in post-harvest quality. The content of phenolic compounds and condensed tannins decreased throughout ripening, while flavonoids and anthocyanins increased, directly influencing antioxidant capacity. Antioxidant activity determined by the FRAP assay decreased significantly and showed a positive correlation with tannins, while that obtained by the ABTS assay increased, associating with the accumulation of flavonoids and anthocyanins. These results provide information on the physiology and postharvest behavior of *P. psychotrioides* and contribute to the design of strategies for the conservation and use of the fruit.

Keywords: fruit ripening, plant physiology, antioxidant capacity, tropical wild fruits, bioactive compounds, nutraceutical potential.

3.1 Introducción

La alimentación humana depende en gran medida de un número limitado de cultivos, lo que ha contribuido a la pérdida de biodiversidad agrícola y al debilitamiento de los conocimientos tradicionales asociados al aprovechamiento de especies nativas (Mahapatra y Panda, 2012). Diversificar la dieta humana, resulta esencial para fomentar la exploración de nuevas fuentes de alimentos con potencial nutricional y funcional (Dwivedi et al., 2017; Mothupi y Shackleton, 2025).

Los frutos nativos representan una fuente valiosa de nutrientes y metabolitos bioactivos, además de desempeñar un papel fundamental en la identidad cultural y alimentaria de las comunidades locales (Mahapatra y Panda, 2012). Sin embargo, la escasa información científica sobre su composición química, dinámica de maduración y comportamiento fisiológico limita su aprovechamiento y restringe su incorporación en esquemas de producción, conservación y comercialización más amplios (Ahmed et al., 2022; Nemapare et al., 2024).

La maduración de los frutos es un proceso fisiológico complejo que define su calidad postcosecha y su valor nutricional. Durante este proceso ocurren transformaciones en las propiedades físicas como firmeza, peso y color, así como en la composición química reflejada en la acumulación de azúcares, cambios en la acidez y la síntesis de compuestos bioactivos, como fenoles y antocianinas, que se relacionan directamente con la aceptación sensorial, la vida útil y el valor nutraceutico del fruto (Andjelkovic et al., 2013; Bashir et al., 2019; Staveckienė et al., 2023). En especies nativas como *P. psychotrioides*, el conocimiento sobre los cambios fisicoquímicos, morfológicos y funcionales a lo largo de la maduración es escaso, lo que representa una limitante para diseñar estrategias de cosecha, manejo poscosecha y aprovechamiento agroindustrial. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue caracterizar los cambios físicos, químicos, fisiológicos y antioxidantes de frutos de *P. psychotrioides* durante diferentes estadios de maduración.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Obtención del material vegetal

Los frutos de *Parathesis psychotrioides* se recolectaron en abril de 2025 en huertos familiares ubicados en Santiago Ecatlán, Puebla, México (20° 3'11.336" N y 97° 33'29.192" O). Se seleccionaron frutos en diferentes estadios de madurez, clasificándolos en seis categorías con base en la relación longitud-diámetro y el color del epicarpio. Una fracción de los frutos se almacenó a 4 ± 0.2 °C para la determinación de características físicas, acidez titulable (AT), pH, sólidos solubles totales (SST) e índice de madurez (SST/AT). Otra fracción se sometió a desemillado manual y posterior liofilización en un equipo FreeZone 2.5 L (LABCONCO) a una presión de 0.035 mbar. Finalmente, los frutos liofilizados se molieron, tamizaron y conservaron a -18 °C hasta su uso en la preparación de extractos.

3.2.2 Caracterización física

Peso promedio: se seleccionaron 100 frutos al azar de cada uno de los estadios de maduración. El peso se registró utilizando una balanza analítica de alta precisión (Sartorius BCE224I-1S) (Alemán-Villa et al., 2024; Sosa et al., 2025).

Dimensiones: se midieron los diámetros polar y ecuatorial con un vernier digital (Truper 14388 CALDI-6MP) (Alemán-Villa et al., 2024; Sosa et al., 2025).

Firmeza: la firmeza de los frutos se evaluó con un texturómetro (Stable Micro Systems) equipado con el software Texture Expert versión 07.13, utilizando el modo de medición de fuerza de compresión. Cada fruto fue sometido a una prueba de punción con una sonda de acero inoxidable que penetró 1 mm en la pulpa, a una velocidad de prueba de 0.1 mm s^{-1} . Las condiciones operativas fueron: velocidad de pre-test de 2.0 mm s^{-1} , velocidad de post-test de 2.0 mm s^{-1} , y modo de retorno automático al punto inicial. La fuerza máxima requerida para la penetración se obtuvo a partir de la curva fuerza-deformación generada por el sistema, expresándose el resultado en Newtons (N). A cada fruto se le realizaron

tres punciones en zonas distintas, y se analizaron cinco frutos por cada estadio de maduración (Lopez-Moreno et al., 2023).

Color: el color de los frutos en los diferentes estadios de maduración se determinó mediante un colorímetro digital (HunterLab MiniScan XE Plus), a un ángulo de observación de 10° y un iluminante D65, utilizando el sistema CIELAB, midiendo la luminosidad (L^*), la coordenada verde-rojo (a^*), la coordenada azul-amarillo (b^*) y la cromaticidad (C^*) (Felts et al., 2019; Sosa et al., 2025).

3.2.3 Obtención de extractos

Se prepararon extractos metanólicos al 80 % (m/v) a partir del material liofilizado, previamente acidificado a pH 3.0 con HCl 0.1 N, siguiendo la metodología descrita por Hernández-Rodríguez et al. (2016). A partir del extracto obtenido se determinó la concentración de azúcares solubles totales, azúcares reductores, fenoles totales, flavonoides totales, antocianinas totales, taninos condensados y la capacidad antioxidante por los ensayos ABTS y FRAP. Todas las absorbancias se midieron en un lector de microplacas (Bio Tek Systems Synergy 2).

3.2.4 Caracterización química

Acidez titulable (AT) y pH: el jugo de los frutos se obtuvo mediante trituración con mortero y posterior filtrado. La acidez titulable se determinó mediante titulación con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.2. La medición del pH se realizó con un potenciómetro Conductronic pH120. La acidez se expresó como porcentaje masa volumen (% m/v) calculada en equivalente de ácido cítrico (Felts et al., 2019; Sosa et al., 2025).

Sólidos solubles totales (SST): se analizaron con un refractómetro digital (ATAGO PAL-1) en grados Brix (°Brix) (Sosa et al., 2025).

El índice de madurez (SST/AT): se calculó dividiendo los sólidos solubles totales (SST, en °Brix) entre la acidez titulable (AT, expresada como porcentaje de ácido cítrico) (Sosa et al., 2025).

Azúcares solubles totales (AST): la concentración de azúcares totales se determinó mediante el método fenol-sulfúrico descrito por (Dubois et al., (1956). Se mezcló 1 mL de fenol al 5 % con 1 mL de extracto, seguido de la adición de 2.5 mL de ácido sulfúrico concentrado. Se preparó la curva de calibración a partir de una solución patrón de glucosa en un rango de concentraciones de 0.030 a 0.6966 mg mL⁻¹. El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9955. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de glucosa por gramo de muestra en peso seco (mg EG g⁻¹).

Azúcares reductores (AR): la concentración de azúcares reductores se determinó mediante el método de reducción cúprica con neocuproína, basado en la reducción de Cu (II) a Cu (I) en medio alcalino, en presencia del quelante 2,9-dimetil-1,10-fenantrolina (Başkan et al., 2016). Se prepararon diluciones a partir de una solución patrón de glucosa en un rango de concentraciones de 0.02 a 0.202 mg mL⁻¹. El modelo lineal obtenido mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9952. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de glucosa por gramo de muestra en peso seco (mg EG g⁻¹).

3.2.5 Caracterización fisiológica

Tasa de respiración (TR): la TR se determinó mediante un método estático adaptado por García-Cruz et al. (2016). Para cada estadio de maduración, se colocaron muestras triplicadas de peso conocido en recipientes herméticos durante una hora para permitir la acumulación de CO₂. Se extrajeron 3 mL de gas acumulado en el espacio de cabeza y se transfirieron a un tubo vacutainer con 3 mL de solución indicadora (bicarbonato de sodio 0.05 % + azul de bromotimol 0.02 %, ajustada a 33 % de transmitancia). La mezcla se agitó durante 15 s y se midió la absorbancia a 615 nm en un espectrofotómetro UV/Vis (Perkin Elmer Lambda 25). Se construyó una curva de calibración con volúmenes conocidos de CO₂, calculando la fracción molar mediante la ecuación de los gases ideales ($PV = nRT$), considerando las condiciones de presión y temperatura del ensayo, el volumen del espacio de cabeza y el peso molecular del CO₂ (44 g mol⁻¹). Los datos experimentales se ajustaron a un modelo biexponencial de la forma:

$\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} = 16.43^{-8.41A} + 108.46^{-50.59A}$, donde A es la absorbancia de la solución indicadora de pH a diferentes concentraciones de CO₂, ($R^2 = 0.936$; RMSE = 2.618). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de CO₂ por kg de fruto por hora (mg ECO₂ kg⁻¹ h⁻¹).

Pérdida de peso acumulado: se tomaron muestras de 10 g de fruto por triplicado para cada estadio de maduración. Estas muestras fueron almacenadas a temperatura ambiente, bajo condiciones naturales de luz y oscuridad, y se pesaron cada 24 horas utilizando una balanza analítica. La pérdida de peso se calculó como el porcentaje de reducción respecto al peso inicial de cada muestra, y los resultados se expresaron como el porcentaje de la pérdida de peso acumulada diaria.

3.2.6 Propiedades antioxidantes

Fenoles totales: el contenido fenólico se determinó según el método de Singleton y Rossi (1965). La curva de calibración se elaboró a partir de una solución patrón de ácido gálico en un rango de concentraciones de 0.010 a 0.092 mg mL⁻¹. El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9988. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por gramo de muestra en peso seco (mg EAG g⁻¹).

Taninos condensados (proantocianidinas): la cuantificación de taninos condensados se realizó mediante el método de 4-dimetilaminocinnamaldehído (DMAC) (Wallace y Giusti, 2010). A partir de una disolución patrón de catequina, se preparó una curva de calibración en un rango de concentraciones de 0.0050 a 0.520 mg mL⁻¹. El coeficiente de determinación (R^2) de la curva fue 0.9986. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de catequina por gramo de muestra en peso seco (mg EC g⁻¹).

Flavonoides totales: el contenido flavonoides totales se determinó siguiendo el método Kubola y Siriamornpun (2011). La curva de calibración se preparó a partir de una solución patrón de catequina en un rango de concentraciones de 0.010 a

0.0192 mg mL⁻¹. El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9956. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de catequina por gramo de muestra en peso seco (mg EC g⁻¹).

Antocianinas monoméricas: la concentración de antocianinas monoméricas se determinó mediante el método de pH diferencial (Lee et al., 2005). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de cianidina-3-O-glucósido por gramo de muestra en peso seco (C3G g⁻¹).

Capacidad antioxidante: la capacidad antioxidante se evaluó mediante los ensayos de ABTS (Re et al., 1999) y FRAP (Benzie y Ceba, 1996). Para ambos métodos se construyó una curva de calibración con trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromo-2-carboxílico) en un rango de concentraciones de 0.054 a 0.647 μ mol mL⁻¹. Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos fueron de 0.9945 para ABTS y 0.9978 para FRAP. Los resultados se expresaron como μ mol equivalentes de trolox por gramo de muestra en peso seco (μ mol ET g⁻¹).

3.2.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico se ejecutó en R (versión 4.4.2). La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y homogeneidad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Levene. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA), reportando los resultados como media $\pm$ desviación estándar. Se emplearon pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis, para las variables peso, tamaño y firmeza, expresando los resultados como mediana (Q1 - Q3). Para explorar relaciones monotónicas entre las variables, se empleó el coeficiente de correlación de Spearman, debido a la naturaleza ordinal de la variable 'Estadios de maduración'. Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ en todas las pruebas.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Características físicas: peso, morfología, firmeza y color

La figura 1 muestra el aspecto morfológico correspondiente a los seis estadios de maduración definidos para *Parathesis psychotrioides* (E1 a E6). Durante el proceso de maduración, se observaron cambios graduales en el tamaño y la coloración del fruto, hasta alcanzar el estadio de consumo. Asimismo, se registraron variaciones significativas en el peso fresco (A), dimensiones (B), firmeza (C), coordenadas colorimétricas a^* y b^* (D), coordenadas L^* y C^* (E), pH y acidez titulable (F), sólidos solubles e índice de madurez (G), así como en los azúcares solubles totales y azúcares reductores (H) en los seis estadios de maduración de frutos de *P. psychotrioides* estudiados (Figura 2).

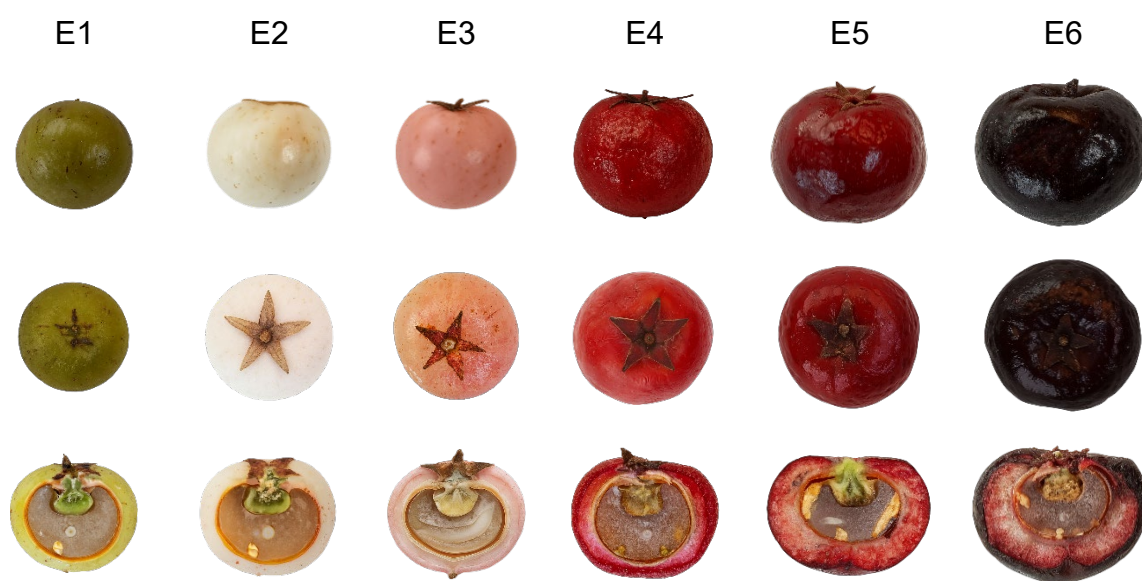


Figura 1. Estadios de maduración del fruto de *P. psychotrioides* según su desarrollo fisiológico

El peso fresco del fruto mostró un incremento estadísticamente significativo ($p < 0.05$) a lo largo de los seis estadios de maduración. Este incremento refleja procesos fisiológicos característicos de la mayoría de los frutos asociados a la acumulación de agua, azúcares y biomasa durante su desarrollo (Gupta et al., 2022). A partir del estadio E3 el peso aumentó considerablemente, alcanzando su valor máximo en el estadio E6 (0.33 (0.299-0.359)), con un incremento del

28.4 % respecto al E5, y de 93 % en comparación con el estadio inicial (E1). Este comportamiento sugiere una intensificación de los procesos de expansión celular del mesocarpio en las últimas etapas de maduración. El aumento de peso en los frutos se asocia a señales hormonales (auxinas, giberelinas, ácido abscísico), factores de transcripción, modificaciones en la pared celular y mecanismos metabólicos que facilitan la acumulación de agua y solutos en las células (Fenn y Giovannoni, 2021; Gupta et al., 2022; He y Yamamuro, 2022).

En relación con el tamaño del fruto, la figura 2B muestra que tanto el diámetro polar como el ecuatorial aumentaron de manera continua y significativa a lo largo de los seis estadios de maduración. El diámetro polar pasó de una mediana de 5.80 (5.66-5.95) mm en E1 a 7.06 (6.85-7.22) mm en E6, lo que representa un incremento del 21.7 %. Por su parte, el diámetro ecuatorial mostró un aumento de 6.76 (6.37-7.07) mm a 8.79 (8.60-9.05) mm en el mismo periodo, correspondiente a un incremento del 30 %, superior al observado en el eje polar. El patrón de crecimiento sugiere que el crecimiento del fruto es predominantemente lateral, otorgándole una morfología elipsoidal u oblonga, con mayor expansión en el eje ecuatorial que en el polar. El E6 presentó los valores máximos en ambos diámetros, lo que coincide con la fase de mayor ganancia de peso y refuerza la relación directa entre el aumento de biomasa y la expansión morfológica (Fenn y Giovannoni, 2021; He y Yamamuro, 2022).

La firmeza del fruto se redujo de forma progresiva y estadísticamente significativa conforme avanzó la maduración (Figura 2C). Entre E1 (477.39 (408.25-549.10) N) y E6 (181.91 (176.00-187.90) N), la pérdida de firmeza alcanzó un 62 %. El E4 marcó el inicio de la fase de ablandamiento perceptible, con una disminución gradual y significativa en E5 y E6. La reducción de la firmeza es un comportamiento común en frutos, tanto climatéricos como no climatéricos, donde la acción de enzimas hidrolíticas como poligalacturonasa, pectato liasa y celulasa inducen la descomposición de polisacáridos de la pared celular, especialmente pectinas y celulosas, lo que conlleva a la pérdida de turgencia y cohesión tisular;

además, es un indicador de madurez de consumo (Díaz-Rincón et al., 2023; LI et al., 2023).

La coordenada a^* (Verde/Rojo) fue un indicador clave de la transición de color del fruto, reflejando el cambio progresivo de tonalidades verdes a rojizas (Figura 2D). En E1, a^* presentó valores negativos (-3.02 ± 0.40), característicos de frutos inmaduros con elevada concentración de clorofila. Conforme avanzó la maduración, el valor de a^* aumentó de manera progresiva y estadísticamente significativa hasta alcanzar su valor máximo en E4 (31.87 ± 0.31). Este incremento está directamente relacionado con la degradación de la clorofila y la consecuente síntesis y acumulación de antocianinas, que son responsables de los tonos rojizos (Kapoor et al., 2022). La disminución de a^* en E5 y E6 sugiere un oscurecimiento del color, asociado al cambio de tonos rojizos hacia tonalidades más oscuras como púrpura o marrón, propias de frutos en etapa avanzada de maduración o inicio de senescencia (Usenik et al., 2009).

Los valores iniciales de b^* (Azul/Amarillo) fueron mayores en E1 (19.80 ± 0.77), indicando una tonalidad amarilla prominente (Figura 2D). Este valor disminuyó significativamente desde E1 hasta E3, seguido de un incremento en E4, y una disminución en E5 y E6. La disminución de la coordenada b^* sugieren una pérdida del componente amarillo en los frutos más maduros, probablemente asociado a la degradación de clorofilas y el aumento de pigmentos oscuros como las antocianinas (Usenik et al., 2009).

Durante el proceso de maduración hubo un incremento inicial en la luminosidad (L^*), alcanzando un valor máximo de 35.65 ± 1.07 en E2 (Figura 2E). Este incremento sugiere un aclaramiento temporal del fruto, probablemente asociado con la degradación inicial de clorofilas y la transición de un tono verde a uno más blanquecino (Figura 1). A partir de E3, la luminosidad disminuyó de manera significativa, registrando los valores más bajos en E5 y E6 (12.44 ± 0.27 y 12.06 ± 1.01 respectivamente). La reducción en la luminosidad es común en frutos que, conforme maduran, desarrollan colores más intensos y oscuros debido a la

acumulación de pigmentos como antocianinas o carotenoides (Kapoor et al., 2022). La ausencia de diferencias significativas entre E5 y E6 indica que el parámetro L^* tiende a estabilizarse en las etapas finales de maduración.

La cromaticidad (C^*) aumentó desde E2 hasta alcanzar su valor máximo en E4 (35.06 ± 0.28) (Figura 2E). Este comportamiento coincide con la percepción visual de una coloración rojiza e intensa (Figura 1), atribuible al aumento en la concentración de pigmentos durante la maduración. Sin embargo, la cromaticidad disminuyó significativamente en E5 y E6 (18.31 ± 1.17 y 10.00 ± 1.00 respectivamente), presentando un comportamiento característico de frutos en etapas avanzadas de maduración o en inicio de deterioro. Esta reducción en la intensidad del color en las fases finales podría estar asociada con procesos de oxidación, senescencia o degradación de pigmentos (Kapoor et al., 2022; Usenik et al., 2009).

3.3.2 Características químicas: pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, índice de madurez, azúcares solubles totales y azúcares reductores

El pH de los frutos de *P. psychotrioides* mostró una variación mínima a lo largo de los distintos estadios de maduración. El valor más bajo se registró en la etapa inmadura (E1) con un pH de 3.77 ± 0.08 , mientras que el más alto fue de 4.00 ± 0.07 en E5. Aunque se observó una ligera tendencia al incremento del pH durante la maduración, esta diferencia no fue estadísticamente significativa ($p > 0.05$). Los frutos en E6 presentaron un pH mayor que los frutos de arándano (3.12) (Hwang et al., 2020), uva (3.40) (Grabowski y Pawlikowski, 2020) y mora (3.14) (Tosun et al., 2008).

La acidez titulable (AT) presentó un incremento constante y estadísticamente significativo ($p < 0.05$) desde E2 hasta E5, pasando de 0.34 ± 0.02 a 0.84 ± 0.02 % de acidez, expresada como equivalente de ácido cítrico (Figura 2F). En E5 y E6, se observó una estabilización de los valores, lo que sugiere un punto de equilibrio en la acumulación de ácidos orgánicos durante los estadios finales de

maduración. Este aumento no fue suficiente para generar cambios significativos en los valores de pH. En muchos frutos, la AT disminuye durante la maduración debido a la degradación y conversión de ácidos orgánicos en energía y azúcares (Basak et al., 2022; Tosun et al., 2008). En contraste, *P. psychotrioides* mostró un comportamiento atípico, caracterizado por un incremento sostenido de la AT. Este patrón es similar al que se observa en frutos tropicales como el maracuyá, donde la AT muestra un comportamiento lineal, alcanzando su valor máximo en la etapa de madurez fisiológica (Gomes et al., 2021). En estudios realizados en kiwi (*Actinidia eriantha*), se ha demostrado que el incremento de la AT durante la maduración se asocia con la acumulación de ácidos orgánicos, impulsada por la actividad de enzimas como la malato deshidrogenasa y la citrato sintasa, que favorecen la síntesis de ácidos, mientras que una menor actividad de enzimas degradativas como la aconitasa limita su catabolismo, permitiendo su acumulación (Jia et al., 2023).

Los sólidos solubles totales (SST) mostraron un incremento progresivo a medida que el fruto alcanzó su madurez de consumo (Figura 2G). Las diferencias entre la mayoría de los estadios de madurez fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$), lo que indica una acumulación continua de azúcares durante su desarrollo. En especies como uva, arándano, mora y fresa, este incremento se debe principalmente a la acumulación directa de glucosa y fructosa en el mesocarpio, más que a la hidrólisis de almidón (Montesano et al., 2016; Nordlund et al., 2018). El aumento en los °Brix es un indicador fisiológico del avance de la maduración y, a la vez, un factor determinante en la percepción sensorial del dulzor. En E6 los frutos de *P. psychotrioides* registraron valores de °Brix superiores a los reportados para fresa (6–7 °Brix) (Pineli et al., 2011) y frambuesa (8–10 °Brix) (Wrolstad et al., 1993), lo que sugiere una mayor percepción de dulzura.

El índice de madurez (SST/AT) incrementó significativamente a lo largo de los seis estadios evaluados (Figura 2G), con el valor más alto en E6 (11.88 ± 0.34). Este incremento se debe principalmente a que el aumento de los °Brix superó

proporcionalmente al de la AT. Un índice de madurez elevado suele correlacionarse positivamente con la calidad sensorial percibida por el consumidor, particularmente por el equilibrio entre dulzura y acidez. Además, es un indicador para determinar el momento óptimo de cosecha en algunos frutos (Grabowski y Pawlikowski, 2020; Hwang et al., 2020).

La figura 2H muestra un incremento progresivo en la concentración de azúcares solubles totales (AST) durante la maduración de los frutos de *P. psychotrioides*. Los valores incrementaron significativamente en E2 a E6 (184.36 ± 17.02 y 572.25 ± 7.93 mg EG g⁻¹, respectivamente), lo que representa un incremento superior al 210 %. Este patrón de acumulación de AST es común en frutos en desarrollo y se asocia principalmente dos mecanismos fisiológicos: la hidrólisis del almidón acumulado en etapas tempranas de desarrollo, que genera azúcares simples como glucosa, fructosa y sacarosa mediante la acción de enzimas como amilasas y sacarosidas en frutos climatéricos; y la acumulación directa de monosacáridos y disacáridos en el fruto con escasa o nula acumulación de almidón, característica de muchos frutos no climatéricos (Chervin, 2020). Los AR siguieron una tendencia similar, incrementando de 178.20 ± 14.38 mg EG g⁻¹ en E1 hasta 554.73 ± 21.42 mg EG g⁻¹ en E6. Este patrón de acumulación continua de azúcares es característico de frutos no climatéricos, donde los carbohidratos se translocan progresivamente desde órganos fotosintéticos hacia el fruto sin los cambios abruptos asociados al metabolismo climatérico (John et al., 1973; Montesano et al., 2016; Nordlund et al., 2018). El análisis estadístico demostró que las concentraciones de AST y AR fueron similares en cada estadio de maduración, lo que indica que la fracción mayoritaria de carbohidratos en *P. psychotrioides* corresponde a azúcares reductores, principalmente monosacáridos como glucosa y fructosa, los cuales determinan el dulzor del fruto (Bashir et al., 2019). Resultados similares han sido reportados en otros frutos no climatéricos, como la uva y el arándano, en los cuales los azúcares reductores (glucosa y fructosa) constituyen la gran mayoría de los azúcares totales en las etapas inmaduras, mientras que la sacarosa se encuentra en niveles muy bajos o en trazas, y a medida que el fruto madura, si bien la concentración total de

azúcares se incrementa significativamente, predomina la proporción de azúcares reductores (Bashir et al., 2019; Samkumar et al., 2022).

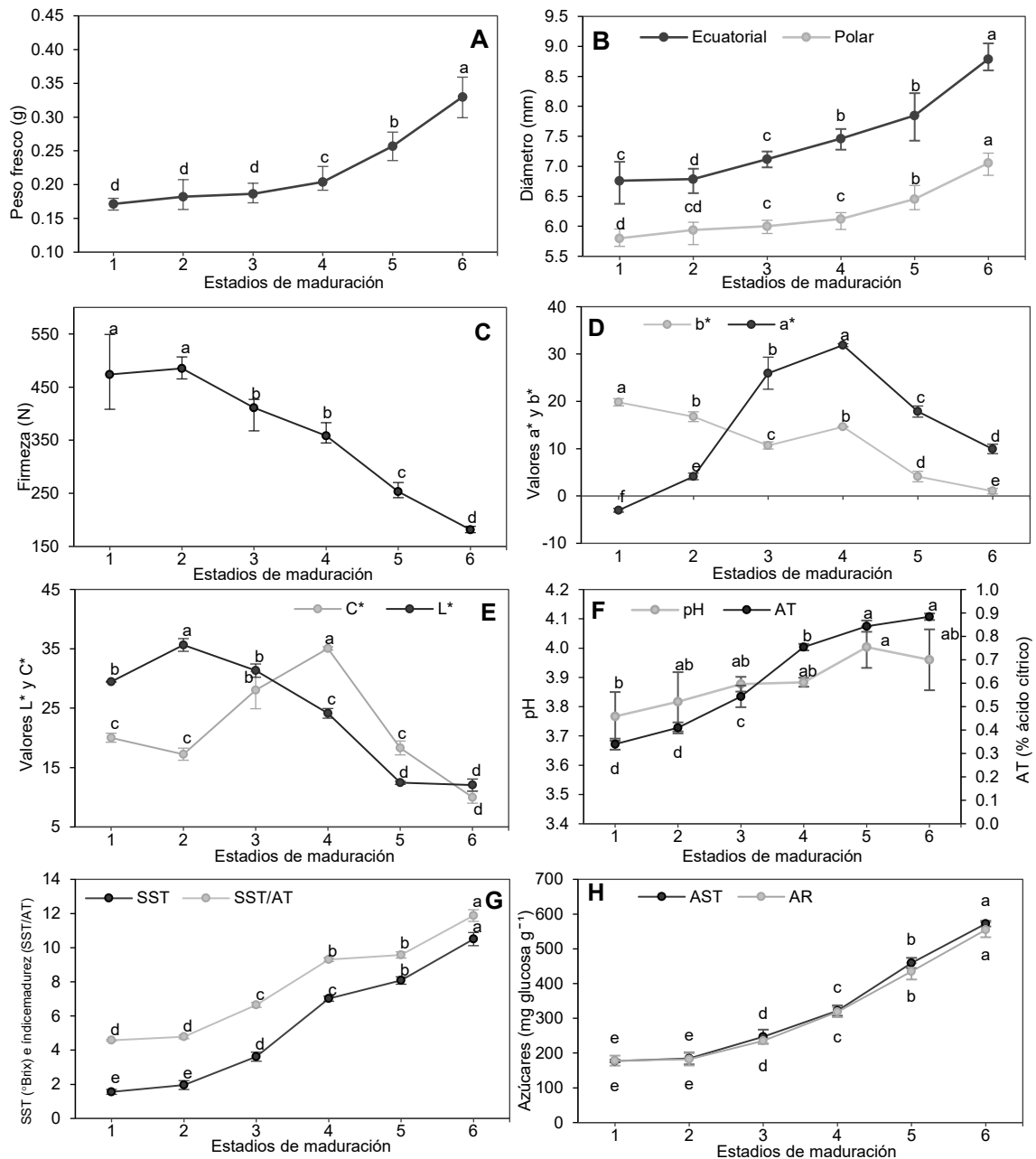


Figura 2. Cambios en las propiedades fisicoquímicas y fisiológicas de frutos de *P. psychotrioides* durante seis estadios de maduración. A. Variaciones en el peso fresco. B. Dimensiones. C. Firmeza. D. Coordenadas colorimétricas a* y b*. E. Coordenadas colorimétricas L* y C*. F. pH y acidez titulable (AT). G. Solidos solubles (SST) e índice de madurez (SST/AT). H. Azúcares solubles totales (AST) y azúcares reductores (AR). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) ($n = 3$).

3.3.3 Características fisiológicas: tasa respiratoria y pérdida de peso acumulado

La tasa respiratoria de los frutos de *P. psychotrioides* se mantuvo sin diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los seis estadios de maduración evaluados (Figura 3A). Este comportamiento difiere de lo observado en frutos climatéricos, donde se presenta un pico respiratorio en los estadios finales de maduración, típicamente asociado a un incremento en la producción de etileno (Moreno et al., 2021; Perotti et al., 2023). La ausencia de este patrón en *P. psychotrioides* sugiere un perfil respiratorio estable (Perotti et al., 2023).

A pesar de la estabilidad en la tasa respiratoria, la pérdida de firmeza observada en los estadios avanzados (E4 a E6, Figura 2C) sugiere la participación de mecanismos de maduración independientes del etileno, posiblemente modulada por fitohormonas como el ácido abscísico (ABA) (Perotti et al., 2023). El ablandamiento podría estar asociada a la acción de enzimas hidrolíticas de la pared celular, como las poligalacturonasas, pectato liasas y expansinas, tal como se ha reportado en frutos no climatéricos como la fresa (Moya-León et al., 2019).

La pérdida de peso acumulado (Figura 3B) permaneció en niveles relativamente elevados durante el proceso de maduración (Moreno et al., 2021), lo que implica una actividad metabólica constante, con liberación continua de CO₂ y vapor de agua. En consecuencia, se registraron pérdidas de peso notables. Estas diferencias podrían atribuirse a variaciones en la morfología de la epidermis, el contenido inicial de agua y la integridad de la cutícula, factores que influyen en la transpiración y la permeabilidad del vapor de agua (Sang y Hai, 2020). Respecto al primer día de almacenamiento, la pérdida de peso varió entre 33.65 % (E5) y 40.54 % (E3). En el cuarto día, los frutos en E1 y E6 presentaron las mayores pérdidas de peso acumulado, alcanzando valores de 72.59 % y 71.0 %, respectivamente. Estos porcentajes son excepcionalmente altos y superan el umbral del 5 a 10 %, lo que puede provocar pérdida de turgencia, marchitamiento

visible y, en consecuencia, una reducción drástica en la calidad poscosecha y en el valor de mercado (Zamorska y Rybchak, 2021).

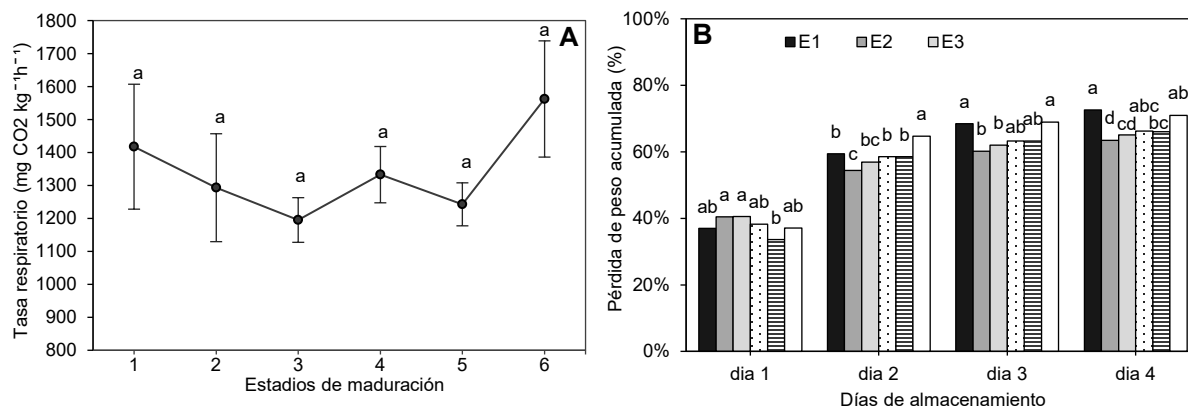


Figura 3. Cambios en las características fisiológicas de frutos de *P. psychotrioides* durante seis estadios de maduración A. variación en la tasa respiratoria. B. Pérdida de peso acumulada. Letras distintas indican diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$).

3.3.4 Propiedades antioxidantes: contenido de compuestos fenólicos, flavonoides, taninos, antocianinas y capacidad antioxidante

En la figura 4 se observa que el contenido de compuestos fenólicos totales en los frutos de *P. psychotrioides* mostró variaciones significativas durante la maduración del fruto. Las concentraciones de fenoles totales fueron estadísticamente iguales en los primeros tres estadios de maduración (E1 a E3), mientras que en E4 aumentó considerablemente (44.09 ± 1.41 mg EAG g⁻¹), seguido de una disminución significativa en E6 (36.58 ± 1.86 mg EAG g⁻¹). Estos resultados sugieren que los estadios intermedios (E4–E5) concentran mayores niveles de compuestos fenólicos, posiblemente como respuesta a la alta actividad metabólica o al estrés oxidativo asociado a los primeros signos visibles de maduración (cambio de color, ablandamiento, etc.), procesos vinculados a la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que estimula la síntesis de fenoles como mecanismo defensivo (Dixon y Paiva, 1995; Staveckienė et al., 2023). La disminución observada en E6 podría deberse a la oxidación enzimática catalizada por polifenoloxidasas o por procesos de polimerización que favorecen su unión a estructuras de la pared celular (Andjelkovic et al., 2013; Queiroz et al., 2008). Estos resultados indican que E5 podría ser el más adecuado para la

cosecha cuando se busca maximizar el contenido de compuestos fenólicos antes de que se inicien procesos degradativos.

Los taninos condensados presentaron una tendencia decreciente a lo largo de la maduración (Figura 4A), con un máximo en E1 ($9.19 \pm 0.79 \text{ mg EC g}^{-1}$) y un mínimo en E6 ($3.32 \pm 0.83 \text{ mg EC g}^{-1}$), mostrando una correlación negativa altamente significativa con la madurez ($r = -0.98$; Figura 5). Este comportamiento corresponde con lo reportado en otras especies frutales, en las que los taninos desempeñan un papel de defensa en etapas tempranas del fruto, generando astringencia y propiedades antinutricionales que reducen el interés de consumo prematuro por parte de herbívoros. En el transcurso de la maduración de los frutos, esta estrategia cambia hacia una función de atracción para los dispersores de semillas, disminuyendo la concentración de taninos para mejorar la palatabilidad (Sarkhosh et al., 2024).

El contenido de flavonoides mostró una tendencia creciente durante la maduración (Figura 4A), aumentando de $4.69 \pm 0.34 \text{ mg EC g}^{-1}$ en E1 hasta un máximo de $15.59 \pm 1.30 \text{ mg EC g}^{-1}$ en E5, con una ligera disminución en E6 ($13.40 \pm 0.11 \text{ mg EC g}^{-1}$), presentando una correlación positiva con la madurez del fruto ($r = 0.89$; Figura 5). Esta disminución podría indicar el inicio de procesos de senescencia o una reorientación metabólica del fruto (Andjelkovic et al., 2013; Queiroz et al., 2008; Staveckienė et al., 2023). La acumulación de flavonoides, particularmente la de las antocianinas, se asocia con el desarrollo del color y la protección del fruto frente a la radiación ultravioleta (Andjelkovic et al., 2013; Dixon y Paiva, 1995). Cabe señalar que la síntesis de estos metabolitos puede verse influenciada por factores ambientales como la luz, la temperatura y el manejo agronómico, por lo que su acumulación no depende exclusivamente del estadio fisiológico (Dixon y Paiva, 1995; Queiroz et al., 2008).

No se detectó presencia de antocianinas monoméricas en E1 y E2, lo que confirma la condición inmadura del fruto. Se observó un incremento en el contenido de antocianinas a partir de E3 ($0.28 \pm 0.03 \text{ mg C3G g}^{-1}$), hasta E6

(11.01 ± 0.43 mg C3G g⁻¹) (Figura 4A), mostrando una correlación positiva fuerte con el estadio de madurez ($r = 0.98$; Figura 5). Esta dinámica coincide con la transición cromática de verde a rojo/púrpura, cuya función no solo es atraer dispersores, sino también aportar protección antioxidante frente al incremento de especies reactivas de oxígeno generadas durante la maduración (Dixon y Paiva, 1995; Queiroz et al., 2008).

Los taninos condensados como las antocianinas derivan de la ruta biosintética de los flavonoides, aunque en distintas etapas o ramificaciones (Lim y Ha, 2021). La acumulación progresiva de antocianinas y la disminución de taninos durante E3 a E6 reflejan una redirección metabólica hacia la producción de pigmentos sobre los compuestos astringentes, asegurando así la dispersión exitosa de las semillas, que es un objetivo biológico fundamental del fruto maduro (Sarkhosh et al., 2024).

La evaluación de la capacidad antioxidante en los distintos estadios de maduración de *P. psychotrioides* presentó tendencias opuestas según el ensayo empleado (FRAP y ABTS), evidenciando que los mecanismos involucrados en la neutralización de especies reactivas son diferentes según avanza el desarrollo fisiológico del fruto (Figura 4B). Este comportamiento ha sido documentado en otros sistemas vegetales y explicado por las diferencias en los principios de reacción de cada ensayo y en la diversidad estructural de los antioxidantes presentes en la matriz vegetal (Floegel et al., 2011; Thaipong et al., 2006).

En el caso del ensayo FRAP, se observó una disminución progresiva y significativa de la capacidad reductora a lo largo de la maduración del fruto (Figura 4B). El valor más alto se registró en E1 (521.07 ± 17.50 μ mol ET g⁻¹), mientras que el más bajo correspondió al E6 (279.68 ± 13.58 μ mol ET g⁻¹). Esta reducción mostró una fuerte correlación negativa con el avance de la maduración ($r = -0.89$, Figura 5), lo que sugiere que los compuestos con mayor capacidad reductora, principalmente taninos, se concentran en las etapas iniciales de desarrollo del fruto y se degradan o transforman a medida que el fruto madura.

La alta correlación positiva entre la capacidad FRAP y el contenido de taninos ($r = 0.88$, Figura 5) apoya firmemente esta hipótesis. Los taninos, conocidos por su abundancia en frutos inmaduros y por su notable poder reductor debido a su estructura polifenólica altamente reactiva, son los principales responsables de la alta capacidad FRAP observada en los primeros estadios (Melo et al., 2023; Motta et al., 2025). A medida que estos compuestos se polimerizan o se degradan durante la maduración, su contribución a la capacidad antioxidante total disminuye, lo que explica la reducción de los valores de FRAP (Motta et al., 2025).

Los resultados del ensayo ABTS, que evalúa la capacidad de secuestrar radicales libres, reflejaron una tendencia opuesta, mostrando una correlación positiva con la maduración del fruto ($r = 0.76$, Figura 5). Los valores se mantuvieron relativamente bajos y sin diferencias significativas en los estadios iniciales (E1 a E3: $\sim 207 \mu\text{mol ET g}^{-1}$), pero aumentaron significativamente a partir de E4 ($346.35 \pm 3.74 \mu\text{mol ET g}^{-1}$), alcanzando su máximo en E5 ($436.64 \pm 8.88 \mu\text{mol ET g}^{-1}$) y disminuyendo ligeramente en E6 ($370.81 \pm 6.75 \mu\text{mol ET g}^{-1}$). Este comportamiento está asociado con la acumulación progresiva de flavonoides y antocianinas entre E4 y E6, compuestos con alta capacidad de neutralización de radicales libres gracias a su estructura aromática e hidroxilada (Floegel et al., 2011), lo que se confirma en las correlaciones positivas entre ABTS y flavonoides ($r = 0.79$), así como entre ABTS y antocianinas ($r = 0.82$) (Figura 5).

En conjunto, estos resultados revelan un cambio en el perfil antioxidante del fruto a lo largo de su maduración. La correlación negativa entre FRAP y ABTS ($r = -0.53$) indica que ambos ensayos evalúan mecanismos complementarios de capacidad antioxidante. En estadios inmaduros predomina la capacidad reductora asociada a la abundancia de taninos (Motta et al., 2025), mientras que en estadios intermedios y avanzados se fortalece la capacidad de secuestro de radicales libres, impulsada por la acumulación de flavonoides y antocianinas (Floegel et al., 2011), lo que evidencia la naturaleza complementaria de ambos métodos y la transición en las estrategias antioxidantes del fruto.

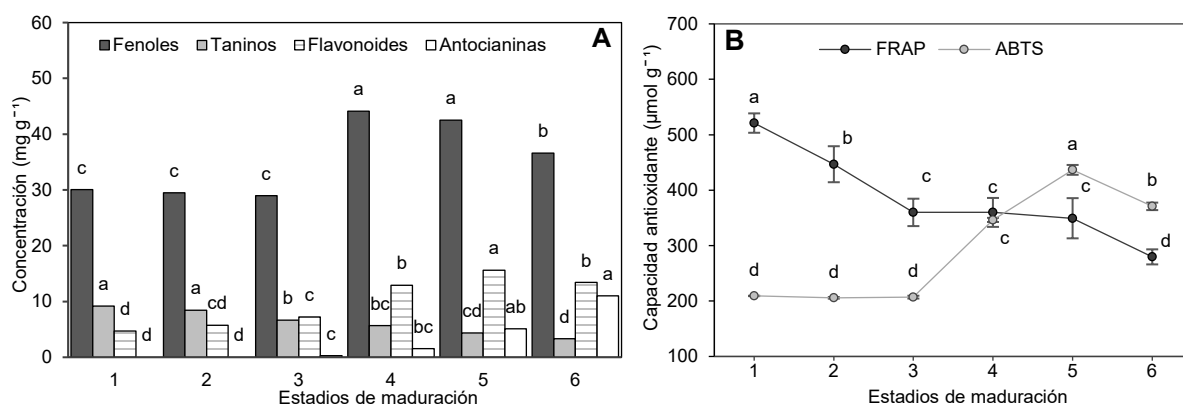


Figura 4. Cambios en los compuestos fenólicos y propiedades antioxidantes de frutos de *P. psychotrioides* durante seis estadios de maduración. A. Variación en el contenido de fenoles totales (mg EGA g⁻¹), taninos (mg EC g⁻¹), flavonoides (mg EC g⁻¹) y antocianinas (mg C3G g⁻¹). B. Cambios en la capacidad antioxidante determinada por los métodos FRAP y ABTS (μmol ET g⁻¹). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

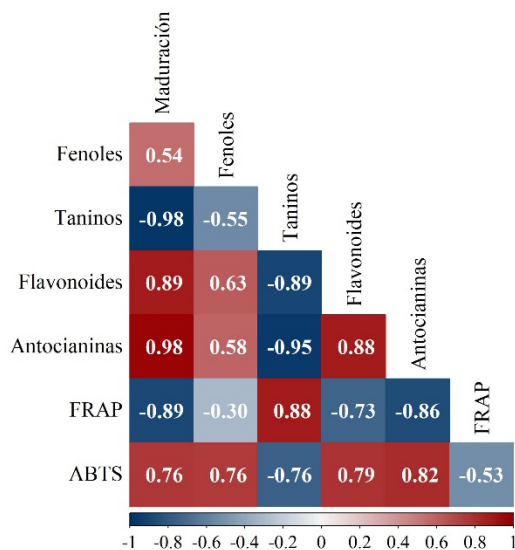


Figura 5. Mapa de calor de los coeficientes de correlación de Spearman entre la capacidad antioxidante (ABTS y FRAP; $\mu\text{mol ET g}^{-1}$), el contenido de fenoles totales (mg EGA g^{-1}), taninos (mg EC g^{-1}), flavonoides (mg EC g^{-1}), antocianinas (mg C3G g^{-1}) y los estadios de maduración de los frutos de *P. psychotrioides*.

3.4 Conclusiones

Los frutos experimentaron un crecimiento continuo con incremento en peso, diámetro polar y ecuatorial, además de pérdida progresiva de firmeza y cambios de color de verde a púrpura oscuro, los cuales constituyen indicadores del estado de maduración. El aumento de la acidez y el incremento sostenido de sólidos solubles totales indican un equilibrio sensorial favorable entre dulzor y acidez, mientras que las concentraciones de azúcares solubles totales y reductores confirmaron el predominio de monosacáridos como principales fuentes energéticas durante la maduración.

La elevada tasa respiratoria registrada en todos los estadios constituyó un factor limitante para la conservación y calidad poscosecha del fruto. El análisis de compuestos polifenólicos confirmó que el tipo y concentración de estos metabolitos varían durante la maduración. El ensayo FRAP demostró mayor sensibilidad a la actividad de compuestos fenólicos predominantes en estadios tempranos, mientras que el ensayo ABTS fue más sensible a la actividad de pigmentos fenólicos acumulados en estadios avanzados.

3.5 Literatura citada

- Ahmed, S. y Warne, T. y Stewart, A. y Byker Shanks, C. y Dupuis, V. (2022). Role of Wild Food Environments for Cultural Identity, Food Security, and Dietary Quality in a Rural American State. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.774701>
- Alemán-Villa, D. y Torres-Aquino, M. y Peredo-Rivera, E. y Tovar-Robles, C. y Delgado-Alvarado, A. (2024). Physicochemical characterization of four varieties of prickly pear (*Opuntia* spp.). *Agro Productividad*, 17(2), 167–173. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.348099>
- Andjelkovic, M. y Radovanović, B. y Radovanović, A. y Andjelkovic, A. M. (2013). Changes in Polyphenolic Content and Antioxidant Activity of Grapes cv Vranac During Ripening. *S. Afr. J. Enol. Vitic*, 34(2), 147–155. <https://doi.org/10.21548/34-2-1090>
- Basak, J. K. y Madhavi, B. G. K. y Paudel, B. y Kim, N. E. y Kim, H. T. (2022). Prediction of Total Soluble Solids and pH of Strawberry Fruits Using RGB, HSV and HSL Colour Spaces and Machine Learning Models. *Foods*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/foods11142086>
- Bashir, S. y Kaur, N. y Arora, N. K. (2019). Dynamics of partitioning of major sugars, total phenols and flavonoids in the juice of seven wine grape (*Vitis* spp.) cultivars during different stages of berry development. *Plant Physiology Reports*, 24(1), 112–118. <https://doi.org/10.1007/s40502-018-0409-1>
- Başkan, K. S. y Tütem, E. y Akyüz, E. y Özen, S. y Apak, R. (2016). Spectrophotometric total reducing sugars assay based on cupric reduction. *Talanta*, 147, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.09.049>
- Benzie, I. y Cega, J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Chervin, C. (2020). Should Starch Metabolism Be a Key Point of the Climacteric vs. Non-climacteric Fruit Definition? *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.609189>
- Díaz-Rincón, L. A. y Balois-Morales, R. y Bautista-Rosales, P. U. y Ochoa-Jiménez, V. A. y Bello-Lara, J. E. y Berumen-Varela, G. (2023). Pectin-Degrading Enzymes during Soursop (*Annona muricata* L.) Fruit Ripening: A Bioinformatics Approach. *Horticulturae*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9101150>
- Dixon, R. A. y Paiva, N. L. (1995). Stress-Induced Phenylpropanoid Metabolism. *The Plant Cell*, 7(7), 1085–1097. <https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.1085>
- Dubois, M. y Gilles, K. A. y Hamilton, J. K. y Rebers, P. A. y Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances.

- Dwivedi, S. L. y Lammerts van Bueren, E. T. y Ceccarelli, S. y Grando, S. y Upadhyaya, H. D. y Ortiz, R. (2017). Diversifying Food Systems in the Pursuit of Sustainable Food Production and Healthy Diets. *Trends in Plant Science*, 22(10), 842–856. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.06.011>
- Felts, M. y Threlfall, R. y Worthington, M. (2019). Physicochemical and descriptive sensory analysis of arkansas-grown peaches and nectarines. *HortScience*, 54(2), 226–235. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13306-18>
- Fenn, M. A. y Giovannoni, J. J. (2021). Phytohormones in fruit development and maturation. *Plant Journal*, 105(2), 446–458. <https://doi.org/10.1111/tpj.15112>
- Floegel, A. y Kim, D. O. y Chung, S. J. y Koo, S. I. y Chun, O. K. (2011). Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(7), 1043–1048. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.01.008>
- García-Cruz, L. y Valle-Guadarrama, S. y Salinas-Moreno, Y. y Luna-Morales, C. del 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>
- Gomes, F. R. y Barbosa, M. A. y Rodrigues, C. D. M. y Hurtado-Salazar, A. y DA SILVEIRA-NETO, A. N. y DA ASSUNÇÃO, H. F. y DA SILVA, D. F. P. (2021). Evaluation of postharvest properties in different passion fruit species during ripening. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(1). <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i1.11948>
- Grabowski, M. y Pawlikowski, M. (2020). Biomineralogical investigation of late-harvest grapes colonised by *Botrytis cinerea* Pers. *Folia Horticulturae*, 32(2), 171–178. <https://doi.org/10.2478/fhort-2020-0016>
- Gupta, K. y Wani, S. H. y Razzaq, A. y Skalicky, M. y Samantara, K. y Gupta, S. y Pandita, D. y Goel, S. y Grewal, S. y Hejnak, V. y Shiv, A. y El-Sabrou, A. M. y Elansary, H. O. y Alaklabi, A. y Brestic, M. (2022). Absciscic Acid: Role in Fruit Development and Ripening. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.817500>
- He, H. y Yamamuro, C. (2022). Interplays between auxin and GA signaling coordinate early fruit development. *Horticulture Research*, 9, 1. <https://doi.org/10.1093/hr/uhab078>
- Hernández-Rodríguez, G. y Espinosa-Solares, T. y Hernández-Eugenio, G. y Villa-García, M. y Reyes-Trejo, B. y Guerra-Ramírez, D. (2016). Influence of Polar Solutions on the Extraction of Phenolic Compounds from Capulín Fruits (*Prunus serotina*). *Journal of the Mexican Chemical Society*, 60(2), 133–1108. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v60i2.76>

- Hwang, H. y Kim, Y. J. y Shin, Y. (2020). Assessment of physicochemical quality, antioxidant content and activity, and inhibition of cholinesterase between unripe and ripe blueberry fruit. *Foods*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/foods9060690>
- Jia, D. y Xu, Z. y Chen, L. y Huang, Q. y Huang, C. y Tao, J. y Qu, X. y Xu, X. (2023). Analysis of organic acid metabolism reveals citric acid and malic acid play major roles in determining acid quality during the development of kiwifruit (*Actinidia eriantha*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(12), 6055–6069. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12678>
- John, W. y Downton, S. y Hawker, J. S. (1973). Enzymes of starch metabolism in leaves and berries of *Vitis vinifera*. *Phytochemistry*, 12(7), 1557–1563. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(73\)80367-X](https://doi.org/10.1016/0031-9422(73)80367-X)
- Kapoor, L. y Simkin, A. J. y George Priya Doss, C. y Siva, R. (2022). Fruit ripening: dynamics and integrated analysis of carotenoids and anthocyanins. *BMC Plant Biology*, 22(27), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03411-w>
- Kubola, J. y Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127(3), 1138–1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115>
- Lee, J. y Durst, R. y Wrolstad, R. y Eisele, T. y Giusti, M. y Hach, J. y Hofsommer, H. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC international*, 88(5), 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>
- LI, X. lu y SU, Q. fang y JIA, R. jian y WANG, Z. dun y FU, J. hong y GUO, J. hua y YANG, H. juan y ZHAO, Z. yang. (2023). Comparison of cell wall changes of two different types of apple cultivars during fruit development and ripening. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(9), 2705–2718. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.07.019>
- Lim, I. y Ha, J. (2021). Biosynthetic pathway of proanthocyanidins in major cash crops. *Plants*, 10(1792), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants10091792>
- Lopez-Moreno, H. y Phillips, M. y Diaz-Garcia, L. y Torres-Meraz, M. A. y de La Torre, F. y Berro, I. y Loarca, J. y Mura, J. y Ikeda, S. y Atucha, A. y Giongo, L. y Iorizzo, M. y Zalapa, J. (2023). A Survey of Key Methods, Traits, Parameters, and Conditions for Measuring Texture in Cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.). *Horticulturae*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040479>
- Mahapatra, A. K. y Panda, P. C. (2012). Wild edible fruit diversity and its significance in the livelihood of indigenous tribals: Evidence from eastern India. *Food Security*, 4(2), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0186-z>

- Melo, L. F. M. de y Aquino-Martins, V. G. de Q. y Silva, A. P. da y Oliveira Rocha, H. A. y Scortecchi, K. C. (2023). Biological and pharmacological aspects of tannins and potential biotechnological applications. *Food Chemistry*, 414(135645), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135645>
- Montesano, D. y Cossignani, L. y Giua, L. y Urbani, E. y Simonetti, M. S. y Blasi, F. (2016). A Simple HPLC-ELSD Method for Sugar Analysis in Goji Berry. *Journal of Chemistry*, 2016(1), 1–5. <https://doi.org/10.1155/2016/6271808>
- Moreno, J. L. y Tran, T. y Cantero-Tubilla, B. y López-López, K. y Becerra Lopez Lavalle, L. A. y Dufour, D. (2021). Physicochemical and physiological changes during the ripening of Banana (Musaceae) fruit grown in Colombia. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1171–1183. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14851>
- Mothupi, F. M. y Shackleton, C. M. (2025). Traditional knowledge and consumption of wild edible plants in rural households, Limpopo Province, South Africa. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s13002-025-00773-5>
- Motta, S. y Cassino, C. y Bosso, A. y Lopresti, M. y Messina, S. y Calegari, G. y Basana, A. y Ravera, M. (2025). Characterization of 37 enological tannins using a multiple technique approach: Linear sweep voltammetry as a rapid method both for classification and determination of antioxidant properties. *Food Chemistry*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141475>
- Moya-León, M. A. y Mattus-Araya, E. y Herrera, R. (2019). Molecular events occurring during softening of strawberry fruit. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00615>
- Nemapare, P. y Mugadza, D. T. y Gadaga, T. H. y Jombo, T. Z. (2024). Indigenous knowledge and marketing of edible wild fruits in Zimbabwe: A case study of Shurugwi, Gokwe south, Chirumhanzu, and Chivi districts. *Journal of Food Technology Research*, 11(3), 62–81. <https://doi.org/10.18488/JFTR.V11I3.3806>
- Nordlund, E. y Lille, M. y Silventoinen, P. y Nygren, H. y Seppänen-Laakso, T. y Mikkelsen, A. y Aura, A. M. y Heiniö, R. L. y Nohynek, L. y Puupponen-Pimiä, R. y Rischer, H. (2018). Plant cells as food – A concept taking shape. *Food Research International*, 107, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.045>
- Perotti, M. F. y Posé, D. y Martín-Pizarro, C. (2023). Non-climacteric fruit development and ripening regulation: ‘the phytohormones show’. *Journal of Experimental Botany*, 74(20), 6237–6253. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad271>
- Pineli, L. de L. de O. y Moretti, C. L. y dos Santos, M. S. y Campos, A. B. y Brasileiro, A. V. y Córdova, A. C. y Chiarello, M. D. (2011). Antioxidants and other chemical and physical characteristics of two strawberry cultivars at different ripeness stages. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.05.004>

- Queiroz, C. y Mendes Lopes, M. L. y Fialho, E. y Valente-Mesquita, V. L. (2008). Polyphenol oxidase: Characteristics and mechanisms of browning control. *Food Reviews International*, 24(4), 361–375. <https://doi.org/10.1080/87559120802089332>
- Re, R. y Pellegrini, N. y Proteggente, A. y Pannala, A. y Yang, M. y Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Samkumar, A. y Karppinen, K. y Dhakal, B. y Martinussen, I. y Jaakola, L. (2022). Insights into sugar metabolism during bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) fruit development. *Physiologia Plantarum*, 174(2). <https://doi.org/10.1111/ppl.13657>
- Sang, N. y Hai, L. H. (2020). Effect of ratio of bees wax and carnauba wax in mixed wax on respiration rate, weight loss, fruit decay and chemical quality of vietnamese passion fruits during low temperature storage. *Pakistan Journal of Biotechnology*, 17(2), 63–0. <https://doi.org/10.34016/pjbt.2020.17.2.63>
- Sarkhosh, A. y Habibi, F. y Brecht, J. K. (2024). Alleviating Astringency in Persimmon Fruit for Enhanced Palatability and Consumer Acceptability. *EDIS*, 2024(3). <https://doi.org/10.32473/edis-hs1483-2024>
- Singleton, V. y Rossi, J. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Sosa, A. V. y Povilonis, I. S. y Borroni, V. y Pérez, E. y Radice, S. y Arena, M. E. (2025). Unveiling the Potential of Southern Elderberry (*Sambucus australis*): Characterization of Physicochemical Properties, Carbohydrates, Organic Acids and Biophenols. *Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 80(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01288-2>
- Staveckienė, J. y Kulaitienė, J. y Levickienė, D. y Vaitkevičienė, N. y Vaštakaitė-Kairienė, V. (2023). The Effect of Ripening Stages on the Accumulation of Polyphenols and Antioxidant Activity of the Fruit Extracts of Solanum Species. *Plants*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/plants12142672>
- Thaipong, K. y Boonprakob, U. y Crosby, K. y Cisneros-Zevallos, L. y Hawkins Byrne, D. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6–7), 669–675. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.01.003>
- Tosun, I. y Ustun, N. y Tekguler, B. (2008). Physical and chemical changes during ripening of blackberry fruits. *Scientia Agricola*, 65(1), 87–90. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000100012>

- Usenik, V. y Štampar, F. y Veberič, R. (2009). Anthocyanins and fruit colour in plums (*Prunus domestica* L.) during ripening. *Food Chemistry*, 114(2), 529–534. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.083>
- Wallace, T. C. y Giusti, M. M. (2010). Evaluation of Parameters that Affect the 4-Dimethylaminocinnamaldehyde Assay for Flavanols and Proanthocyanidins. *Journal of Food Science*, 75(7), C619–C625. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01734.x>
- Wrolstad, R. y McDaniel, M. y Durst, R. y Micheals, N. y Lampi, K. y Beaudry, E. (1993). Composition and sensory characterization of red raspberry juice concentrated direct-osmosis or evaporation. *Journal Of Food Science*, 58(3), 633–637. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04344.x>
- Zamorska, I. y Rybchak, O. (2021). Weight loss and commodity evaluation of pear fruits during storage depending on the packaging method. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies*, 4 (10), 82–87. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.11>

4 COMPOSICIÓN NUTRICIONAL Y POTENCIAL FUNCIONAL DE *Parathesis psychotrioides*, UN FRUTO SILVESTRE CONSUMIDO TRADICIONALMENTE POR COMUNIDADES TOTONACAS EN MÉXICO

Resumen

Parathesis psychotrioides, conocido como *aktala'huat* en la lengua totonaca, es un fruto silvestre consumido tradicionalmente en comunidades indígenas de la Sierra Norte de Puebla, México. El objetivo de este estudio fue caracterizar los frutos maduros para determinar su valor nutricional y su potencial como fuente de compuestos bioactivos. Se aplicaron métodos oficiales (AOAC) para el análisis proximal, ICP-MS para la determinación mineral y técnicas espectrofotométricas para cuantificar compuestos funcionales. Los frutos mostraron contenidos elevados de compuestos fenólicos (475.35 ± 11.68 mg EAG/100 g), flavonoides (208.72 ± 7.52 mg EC/100 g), antocianinas (173.50 ± 2.15 mg C3G/100 g) y taninos condensados (166.94 ± 8.25 mg EC/100 g). La capacidad antioxidante fue notable (ABTS: $5536.21 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g}$; FRAP: $3395.45 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g}$; DPPH: $3218.11 \mu\text{mol ET}/100 \text{ g}$; IC_{50} DPPH: $55.71 \pm 1.17 \mu\text{g/mL}$). Asimismo, destacaron por su contenido de potasio, fósforo, magnesio, hierro y zinc. Estos resultados evidencian el potencial de *P. psychotrioides* como alimento funcional y fuente de compuestos con aplicaciones nutraceuticas y biotecnológicas. El conocimiento generado contribuye al rescate de saberes tradicionales, promueve el uso de recursos locales y fortalece estrategias de conservación y seguridad alimentaria sustentables.

Palabras clave: potencial nutraceutico, frutos silvestres comestibles, capulín del monte, alimento funcional, conservación de los recursos genéticos vegetales.

Tesis de Maestría en Ciencias. Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria.

Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Guillermo Andrés Parrado Castro

Director de tesis: Dra. Diana Guerra Ramírez

Artículo enviado a: *Revista Bioecnia*

Estatus del manuscrito: Aceptado el 08 de noviembre de 2025.

NUTRITIONAL COMPOSITION AND FUNCTIONAL POTENTIAL OF *Parathesis psychotrioides*, A WILD FRUIT TRADITIONALLY CONSUMED BY TOTONAC COMMUNITIES IN MEXICO

Abstract

Parathesis psychotrioides, known as aktala'huat in the Totonac language, is a wild fruit traditionally consumed by indigenous communities in the Sierra Norte of Puebla, Mexico. The aim of this study was to characterize ripe fruits to determine their nutritional value and potential as a source of bioactive compounds. Official AOAC methods were applied for proximal analysis, ICP–MS for mineral determination, and spectrophotometric techniques to quantify functional compounds. The fruits showed high contents of phenolic compounds (475.35 ± 11.68 mg GAE/100 g), flavonoids (208.72 ± 7.52 mg CE/100 g), anthocyanins (173.50 ± 2.15 mg C3G/100 g), and condensed tannins (166.94 ± 8.25 mg CE/100 g). Antioxidant capacity was remarkable (ABTS: $5536.21 \mu\text{mol TE}/100$ g; FRAP: $3395.45 \mu\text{mol TE}/100$ g; DPPH: $3218.11 \mu\text{mol TE}/100$ g; IC₅₀ DPPH: $55.71 \pm 1.17 \mu\text{g/mL}$). In addition, the fruits stood out for their content of potassium, phosphorus, magnesium, iron, and zinc. These results demonstrate the potential of *P. psychotrioides* as a functional food and a source of compounds with nutraceutical and biotechnological applications. The knowledge generated contributes to the preservation of traditional knowledge, promotes the use of local resources, and supports sustainable strategies for conservation and food security.

Keywords: nutraceutical potential, wild edible fruits, capulín del monte, functional food, conservation of plant genetic resources.

⁶ Master of Science Thesis. Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria.
Universidad Autónoma Chapingo
Author: Guillermo Andrés Parrado Castro
Advisor: Dra. Diana Guerra Ramírez
Article submitted to: *Revista Bioecnia*
Manuscript status: Accepted on November 8, 2025.

4.1 Introduction

The genus *Parathesis* (Primulaceae) comprises 96 species that are native to Mexico, Central America, the Caribbean, and northwestern South America (Ricketson y Pipoly, 2008). This genus includes *P. psychotrioides* Lundell, a shrub native to central, northeastern, southeastern, and southwestern Mexico that produces violet-colored drupes when ripe (Plants of the World Online, 2025). In the Sierra Norte de Puebla region of Mexico, these fruits are known as 'capulín del monte', 'aktala'huat' in the Totonaca language, and 'xalcapolin' in the Nahuatl language (GBIF Backbone Taxonomy, n.d.).

P. psychotrioides belongs to a group of wild fruits that includes *Ardisia compressa*, *Ardisia escallonioides*, *Prunus serotina*, and *Muntingia calabura*. These fruits are commonly referred to as “capulín or capulí” in different regions of Latin America. Despite sharing this popular name, these species belong to distinct botanical families and exhibit diverse properties, uses, and chemical compositions (Lascurain et al., 2010; Mahmood et al., 2014; Pathania et al., 2022). Research on some of these species has revealed notable nutritional and nutraceutical properties. For example, *P. serotina* fruits have high antioxidant and antihypertensive potential (Luna-Vázquez et al., 2013), and *A. compressa* has been reported as a tropical source of natural pigments and phenolic compounds (Joaquín-Cruz et al., 2015). However, unlike these species, *P. psychotrioides* has received little scientific attention, lacks commercial value and remains underutilized.

Edible wild fruits are closely connected to the cultural identity and traditions of indigenous and rural communities (Ahmed et al., 2022; Mahapatra y Panda, 2012). Their presence in rituals, festivities, and daily diets reflects not only a cultural as well as resilience to social and environmental change (Ahmed et al., 2022). However, modernization and environmental changes threaten the traditional knowledge associated with these resources and their uses. Beyond their cultural significance wild fruits are essential for dietary diversity and nutrition, particularly during times of food scarcity (Ahmed et al., 2022). In rural,

marginalized or hard-to-reach areas, these fruits can complement or even substitute conventional crops when harvests fail or resources are scarce (Ahmed et al., 2022; Mahapatra y Panda, 2012). Their accessibility and low cost make them a safety net for vulnerable households. In several regions, they also represent an important source of household income through commercialization (Ahmed et al., 2022; Jabeen et al., 2024; Mahapatra y Panda, 2012).

Globally, underutilized fruits are attracting increasing attention as potential functional foods and for their contribution to food security, sustainable diets and biodiversity conservation (Dwivedi et al., 2017). Numerous wild plants are recognized as sources of macronutrients, micronutrients, vitamins, minerals, fiber, and bioactive compounds, including phenolic compounds, flavonoids, and anthocyanins. These compounds have been associated with significant antioxidant capacity and the prevention of chronic diseases (Glew et al., 2005; Martinez et al., 2023). However, information on the physicochemical composition and nutraceutical potential of *P. psychotrioides* is limited, creating a critical knowledge gap that threatens the sustainable conservation and valorization of this species. This study aimed to evaluate the nutraceutical potential of *P. psychotrioides* fruits by analyzing their physicochemical, nutritional, and antioxidant properties. The study focused on describing the characteristics of ripe fruits, analyzing their nutritional and mineral composition, and quantifying their functional compounds and antioxidant capacity. Additionally, the study explored the cultural significance of these fruits within Totonac communities. This approach encourages the consumption of native fruits as a conservation strategy and helps preserve local food heritage.

4.2 Material and methods

4.2.1 Obtaining ethnobotanical information

Information on the fruits of *P. psychotrioides* and their use in the preparation of traditional foods was obtained through participant observation and semistructured interviews conducted in the indigenous Totonaca community of Santiago Ecatlán,

municipality of Jonotla, Puebla. The interviews focused mainly on the matriarchs of the families, women over 50 years of age who are responsible for household nutrition. The questions focused on aspects such as the common names of the fruits in the Totonaca and Spanish languages, the characteristics of the plant's growing environment, the season and traditional methods of harvesting, the forms of consumption and the preparation of traditional foods based on these fruits. The study received informed consent from all participants.

4.2.2 Sample collection and preparation

The fruits of *P. psychotrioides* were collected in April 2024 from home orchards in Santiago Ecatlán (20° 3'11.336" N and 97° 33'29.192" W). The fruits were selected at maturity, determined visually by their dark purplish coloration, following criteria used by local inhabitants. Prior to fruit collection, during the flowering stage of the plant, identification and botanical determination of the species were carried out. The specimen was herborized and deposited in the Hortorio Jorge Espinosa Salas Herbarium (JES) of the Biology Area of the Universidad Autónoma Chapingo under registry number 26076.

A portion of the collected fruits was stored at 4 ± 0.2 °C for subsequent physicochemical analysis. Another portion was subjected to manual desizing and freeze-drying (FreeZone 2.5 L Labconco) at 0.035 mbar. The freeze-dried fruits were ground, sieved and stored for subsequent analyses.

4.2.3 Compound extraction

First, 0.2 g of lyophilized sample was mixed with 25 mL of 80 % methanol and acidified to pH 3.0 with 0.1 N HCl, following the methodology of Hernández-Rodríguez et al., (2016). The resulting extracts were subjected to spectrophotometric analyses to quantify total phenolic compounds (Singleton y Rossi, 1965), flavonoids (Kubola y Siriamornpun, 2011), anthocyanins (Lee et al., 2005), and condensed tannins (Wallace y Giusti, 2010). Antioxidant capacity was assessed through ABTS (Re et al., 1999), FRAP (Benzie y Cepas, 1996) and DPPH (Brand-Williams et al., 1995) assays. Absorbance readings were

performed using a Synergy 2 microplate reader (BioTek Instruments), under conditions specific to each assay.

4.2.4 Morphological and physicochemical characterization

Average weight: One hundred ripe fruits were randomly selected for average weight determination. Weight was recorded using a high-precision analytical balance (Sartorius BCE224I-1S). For each fruit, the whole fruit, endocarp and seed were weighed separately (Alemán-Villa et al., 2024; Sosa et al., 2025).

Dimensions and sphericity index: The polar and equatorial diameters were measured with a digital Vernier caliper (Truper 14388 CALDI-6MP), and the ratio of these values was calculated (Alemán-Villa et al., 2024; Sosa et al., 2025).

Total soluble solids (TSS): TSS were determined with a digital refractometer (ATAGO PAL-1) in degrees Brix (°Brix) (Sosa et al., 2025).

Titrateable acidity (TA) and pH: The filtered juice was titrated with 0.1 N NaOH to reach a pH of 8.2. The pH was measured with a Conductronic pH120 meter. TA is expressed as the percentage weight/volume (% w/v) of citric acid (Felts et al., 2019; Sosa et al., 2025).

Maturity Index (TSS/TA): The maturity index is calculated by dividing total soluble solids (TSS) by titrateable acidity (TA) and expressing the result as °Brix/% citric acid (Sosa et al., 2025).

Moisture content: The moisture content of the edible part of the fruit (epicarp and mesocarp), was determined. The samples were analyzed using a thermobalance (Ohaus MB 45) heated to 100 °C until a constant weight was reached (Alemán-Villa et al., 2024).

4.2.5 Determination of nutritional properties

Proximal analysis: Proximal analysis was performed according to the official AOAC methods for protein (960.52), fat (920.39), ash (900.02) and dietary fiber (985.29). The carbohydrate content was obtained by subtracting the percentages

of the other components. Metabolizable energy was calculated using Atwater's conversion factors: 4 kcal/g for protein and carbohydrates and 9 kcal/g for lipids (AOAC - Association of Official Analytical Chemists, 2016). All analyses were performed in triplicate.

Total gross energy: The gross energy of the edible portion of the *P. psychotrioides* fruits was determined by measuring the heat of combustion released during complete oxidation (Hopper et al., 2024) using a Parr isoperibolic automatic calorimeter (model 6400).

Mineral content: The mineral content was determined following the method described by Lordache et al. (2022). Acid digestion of the plant and soil samples was performed using HNO₃, HF, H₂O₂ and a 2:1 (v/v) solution of HNO₃ and HCl, with the inclusion of internal standards (Y, In, Ir, and Bi). The digestion process included cold and hot steps, followed by reconstitution in 2 % v/v HNO₃. Elemental analysis was performed using inductively coupled plasma–mass spectrometry (ICP–MS, KED mode) with multielemental standards. The methodology was validated in terms of recovery (90–110 %) and precision (RSD < 5 %).

4.2.6 Determination of the total phenolic, total flavonoid, total anthocyanin, and condensed tannin contents and antioxidant capacity

Total phenolic content: The phenolic content was determined following the method of Singleton y Rossi (1965). A standard curve was prepared using solutions of gallic acid in the concentration range of 0.00125 to 0.01125 mg/mL. The coefficient of determination (R^2) of the gallic acid standard curve was 0.9952. The results are expressed as mg of gallic acid equivalents (GAE)/100 g of fresh weight (FW).

Total flavonoid content: The flavonoid content was determined following the method of Kubola y Siriamornpun (2011). A standard curve was prepared with catechin solutions in the concentration range of 0.00101 to 0.0160 mg/mL. The

R^2 value of the catechin standard curve was 0.9990. The results are expressed as mg of catechin equivalents (CE)/100 g FW.

Concentration of monomeric anthocyanins: A previously reported differential pH method was used to determine the anthocyanin concentration (Lee et al., 2005). The values obtained were used to calculate the anthocyanin concentration in mg of cyanidin-3-O-glucoside (C3G)/100 g of FW.

Determination of condensed tannins (proanthocyanidins): The condensed tannins in each sample were quantified using the 4-dimethylaminocinnamaldehyde (DMAC) method (Wallace y Giusti, 2010). A standard curve was prepared using catechin standard solutions with concentrations ranging from 0.050 to 0.500 mg/mL. The R^2 value of the catechin curve was 0.9964. The results are expressed as mg CE/100 g FW.

Antioxidant capacity (ABTS method): The method described by Re et al. (1999) was used for the ABTS assay. A standard curve of 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) was constructed in the concentration range of 0.050 to 0.599 $\mu\text{mol/mL}$. The R^2 value of the Trolox standard curve was 0.9971. The results are expressed as μmol of Trolox equivalents (TE)/100 g FW.

Antioxidant capacity (FRAP method): The methodology proposed by Benzie y Cepa (1996) was used for the FRAP assay, in addition to the previously described Trolox standard curve. The R^2 value of the Trolox standard curve was 0.9988. The results are expressed as $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g FW}$.

Antioxidant capacity (DPPH method): The antioxidant capacity was determined using the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) method, as described by Brand-Williams et al. (1995), with slight modifications. Aliquots of 200 μL of extract at various concentrations (12–180 $\mu\text{mol/L}$) were mixed with 50 μL of a 500 $\mu\text{mol/L}$ DPPH solution. The mixture was then incubated at room temperature in the dark for 30 minutes. Absorbance was measured at 515 nm. A Trolox calibration curve

(0.005–0.030 $\mu\text{mol/mL}$) was constructed, yielding an R^2 value of 0.9927. The results were expressed as $\mu\text{mol TE}/100 \text{ g FW}$ and as IC_{50} values, which are defined as the extract concentration (mg/mL) required to achieve 50 % scavenging of the DPPH radical. Additionally, the IC_{50} value was expressed as the amount of sample (ng) required per nmol of DPPH to provide a normalised measure that is independent of the initial DPPH concentration used in the assay (Martinez-Morales et al., 2020).

4.2.7 Statistical analysis

All experimental data are presented as the mean $\pm$ standard deviation ($n = 3$). Descriptive analyses were conducted using R software (version 4.4.2; R Core Team, 2024). Comparisons with previously published data were made qualitatively, without statistical inference.

4.3 Results and discussion

4.3.1 Ethnobotanical importance

P. psychotrioides grows wild or is tolerated in home gardens, pastures, and ranches without agronomic management. Fruiting is seasonal and concentrated between April and May, which limits its availability. Owing to the high perishability of the fruit, consumption is restricted to harvest time, making it highly valued in the local food calendar. The fruit of *P. psychotrioides*, known locally as aktala'huat, plays a fundamental role in the diet and culture of the Totonaca community of Santiago Ecatlán, municipality of Jonotla, Puebla, Mexico. The fruits are often consumed directly from the bush, especially among those who work in family gardens or ranches, as a snack. However, the most common way to use the fruits is through the preparation of atole and aguas frescas.

Atole is a drink prepared from the juice of the fruit mixed with nixtamalized corn dough and that has symbolic value for the community's inhabitants. It is predominantly made by older women, who have detailed knowledge of the harvesting, selection and processing of the fruit. Atole preparation and

consumption are closely linked to family gatherings, where its consumption strengthens social ties and contributes to intergenerational cohesion. In various indigenous cultures, beverages made from local fruits play symbolic roles in agricultural rituals, seasonal transitions, or giving thanks to nature (Lasso García et al., 2024). The traditional knowledge associated with the use of this fruit not only highlights the importance of biodiversity in the cultural resilience of indigenous peoples but also emphasizes the symbiotic relationship between communities and their natural environment.

4.3.2 Morphological characteristics of the fruit

The fruit of *P. psychotrioides* is an ovoid drupe, with an equatorial diameter of 8.67 ± 0.60 mm, greater than the polar diameter of 7.04 ± 0.48 mm, which translates into a sphericity index of 0.81 ± 0.030 . The average weight of the fruits collected was 0.274 ± 0.055 g, of which 0.087 ± 0.024 g corresponded to the seeds. The edible fraction (pulp and epicarp) represented 68.32 % of the total weight, equal to 0.187 ± 0.060 g. Figure 6 shows images of a *P. psychotrioides* plant and its fruits.

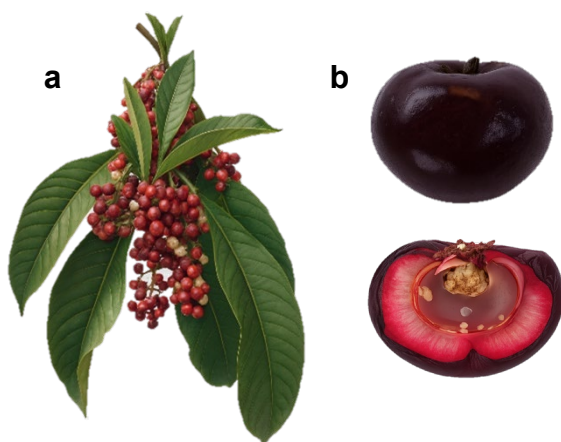


Figure 6. a. Fruits of *P. psychotrioides* on the plant. b. *P. psychotrioides* fruit cut in the longitudinal direction.

Figura 6. a. Frutos de *P. psychotrioides* en la planta. b. Fruto de *P. psychotrioides* cortado en dirección longitudinal.

4.3.3 Physicochemical characteristics of the fruit

The percent TSS, pH, percent TA and TSS/TA ratio values determined for the *P. psychotrioides* fruits are presented in Table 1, which also includes data from other species commonly referred to as capulín, including *A. compressa* (Primulaceae) (Joaquín-Cruz et al., 2015), *P. serotina* (Rosaceae) (Rios-Corripio et al., 2024) and *M. calabura* (Muntingiaceae) (Pereira et al., 2016), with which *P. psychotrioides* is often confused owing to their external appearance.

Table 1. Physicochemical characterization of the fruits of *P. psychotrioides* and other capulín species.

Cuadro 1. Caracterización fisicoquímica de los frutos de *P. psychotrioides* y de otras especies de capulín

Species	TSS	pH	TA	TSS/AT	Reference
<i>Parathesis psychotrioides</i>	11.41±0.69	4.07±0.0	0.82±0.02	13.88±0.95	Present study
<i>Ardisia compressa</i>	9.7±1.1	2.73±0.0	2.56±0.03	3.79±0.43	Joaquín-Cruz et al. (2015)
<i>Prunus serotina</i>	16.2±0.02	4.57±0.0	0.57±0.01	28.42±0.50	Rios-Corripio et al. (2024)
<i>Muntingia calabura</i>	10.24±0.48	5.64±0.0	0.11±0.01	93.76±0.67	Pereira et al. (2016)

The results are expressed as °Brix for total soluble solids (TSS), % w/v citric acid for titratable acidity (TA), and as the °Brix/% citric acid ratio for the maturity index (TSS/TA).

According to the data in Table 1, there are more TSS in *P. psychotrioides* fruits than in *M. calabura* and *A. compressa* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Pereira et al., 2016), suggesting a greater concentration of dissolved compounds, mainly sugars. However, the sugar content of *P. psychotrioides* fruits is lower than that of *P. serotina* fruits (Rios-Corripio et al., 2024). The TSS value of *P. psychotrioides* fruits suggests that they are sweeter than other fruits, such as strawberry (6–7 °Brix) (Pineli et al., 2011) and raspberry (8–10 °Brix) (Wrolstad et al., 1993), although they are not as sweet as blueberries (10–15 °Brix) (Bett-Garber et al., 2015) and grapes (16–25 °Brix) (Fernandes et al., 2015; Jamali et al., 2024). With respect to pH, the fruits of *P. psychotrioides* are slightly acidic, with a pH value higher than *A. compressa* fruits but lower than *M. calabura* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Pereira et al., 2016). Compared with blueberries (pH 3.0-3.5) (Bett-Garber et al., 2015), raspberries (pH 3.0-3.5) (Wrolstad et al., 1993), strawberries

(pH 3.3-3.7) (Pineli et al., 2011) and grapes (pH 3.2-4.0) (Fernandes et al., 2015; Jamali et al., 2024), *P. psychotrioides* fruits exhibit lower acidity. Although this characteristic may favor its organoleptic acceptability, it also makes the fruits more susceptible to the proliferation of microorganisms, which could negatively affect its conservation and reduce its postharvest shelf life (Redding et al., 2023).

The TA of *P. psychotrioides* fruits was notably lower than that of *A. compressa* fruits, the species with the highest TA among the wild fruits analyzed, but higher than that of the fruits of *M. calabura* and *P. serotina* (Joaquín-Cruz et al., 2015; Pereira et al., 2016; Rios-Corripio et al., 2024). Similarly, the TA values obtained for *P. psychotrioides* were within the ranges reported for fruits such as blueberry (0.7-1.2) (Bett-Garber et al., 2015), strawberry (0.7-1.1) (Pineli et al., 2011) and grape (0.5-0.8) (Fernandes et al., 2015; Jamali et al., 2024), which are generally expressed as percentages of citric or tartaric acid. Although the TSS/TA ratio of *P. psychotrioides* fruits was lower than that of *P. serotina* and *M. calabura* fruits, it was considerably higher than that of *A. compressa* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Pereira et al., 2016; Rios-Corripio et al., 2024). A higher TSS/TA ratio indicates a sweeter and less acidic sensory profile, which is generally preferred by consumers (Jayasena y Cameron, 2008), suggesting that *P. psychotrioides* fruits, despite their relatively high TSS content, do not exhibit such a pronounced sweetness perception due to their acidity.

4.3.4 Proximate and mineral composition

Table 2 compares the proximate composition of *P. psychotrioides* fruits with fruits of other species, such as *A. compressa*, *P. serotina* and *M. calabura* (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013; Pereira et al., 2016). The fruits of *P. psychotrioides* had a high moisture content, which was lower than that of *A. compressa* fruits but higher than that of *P. serotina* and *M. calabura* fruits, which is characteristic of fresh fruits. The carbohydrate content of *P. psychotrioides* fruits was higher than that of *A. compressa* fruits, comparable to the content in *P. serotina* fruits, but notably lower than that of *M. calabura* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013; Pereira et al., 2016). This indicates that the

fruits of *P. psychotrioides* are a moderate energy source, surpassing fruits such as strawberry (7.96 g/100 g FW) and approaching the carbohydrate concentration of raspberry (12.9 g/100 g FW) and blueberry (14.6 g/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025). The lipid content of *P. psychotrioides* fruits was low, similar to that of *A. compressa* fruits. However, it was higher than the lipid content in *P. serotina* fruits and considerably lower than that of the fruits of *M. calabura* (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013; Pereira et al., 2016). This low level of lipids is characteristic of wild fruits and suitable for hypocaloric diets. In terms of protein content, *P. psychotrioides* fruits presented a greater value than did *A. compressa* fruits but a lower value than the fruits of *P. serotina* and *M. calabura* (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013; Pereira et al., 2016). However, the protein content of *P. psychotrioides* fruits exceeded that reported in strawberry (0.64 g/100 g FW) and blueberry (0.7 g/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025). The crude fiber content of *P. psychotrioides* fruits was the lowest among the species compared, suggesting a moderate content of dietary fiber; however, this level is still appropriate for regulating intestinal transit and maintaining digestive health (Wrick et al., 1983). On the other hand, the ash content in *P. psychotrioides* fruits was higher than that in the other species (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013; Pereira et al., 2016), indicating a higher concentration of minerals. Ash represents the inorganic fraction of a plant sample, the minerals remaining after combustion. Therefore, a high ash content is a direct indicator of a greater total concentration of essential elements such as calcium, magnesium, potassium, and phosphorus (Smółka-Danielowska y Jabłońska, 2022). However, the specific mineral composition can vary considerably based on factors such as plant species, the part of the plant analyzed, soil type, and growing conditions (Hill, 2013). Furthermore, this value in *P. psychotrioides* fruits far exceeded those reported for strawberry (0.34 g/100 g FW), raspberry (0.35 g/100 g FW) and blueberry (0.23 g/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025). The *P. psychotrioides* fruits metabolizable energy was comparable to that for apple (61 kcal/100 g FW), raspberry (57 kcal/100 g FW) and blueberry (64 kcal/100 g FW) fruits and higher than that

reported for strawberry (36 kcal/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025), which reinforces the nutritional potential of *P. psychotrioides* fruits, especially in diets seeking energy balance without excessive caloric intake. Finally, the gross energy of the *P. psychotrioides* fruits, as determined by bomb calorimetry, was 60.41 ± 0.29 kcal/100 g FW. This value is approximately 15.8 % greater than the metabolizable energy reported in Table 2. This result was expected since the Atwater method reflects the energy theoretically usable by the organism, whereas the calorimetric method quantifies the total energy contained in the food without distinguishing between the usable fraction and the fraction not available for human metabolism (Sánchez-Peña et al., 2020).

Table 2. Proximal analysis of *P. psychotrioides* fruits and other capulín species

Cuadro 2. Análisis proximal de los frutos de *P. psychotrioides* y de otras especies de capulín.

Component	<i>P. psychotrioides</i>	<i>A. compressa</i>	<i>P. serotina</i>	<i>M. calabura</i>
Humidity	84.44 ± 1.24	86.85 ± 0.49	81.18 ± 0.87	77.36 ± 2.23
Carbohydrates	11.26 ± 1.25	9.64 ± 0.24	12.23 ± 0.79	14.64 ± 2.40
Fats	0.41 ± 0.04	0.54 ± 0.07	0.05 ± 0.01	2.34 ± 0.30
Proteins	0.87 ± 0.01	0.77 ± 0.01	2.10 ± 0.01	2.64 ± 0.18
Crude Fiber	1.20 ± 0.11	1.62 ± 0.02	3.58 ± 0.03	1.75 ± 0.30
Ash	1.82 ± 0.13	0.58 ± 0.005	0.86 ± 0.11	1.28 ± 0.16
Metabolizable energy	52.19 ± 5.02	46.5 ± 1.15	57.77 ± 3.16	90.18 ± 10.00
Reference	Present study	Joaquín-Cruz et al. (2015)	Luna-Vázquez et al. (2013)	Pereira et al. (2016)

The results are expressed as g/100 g fresh weight (FW), except for metabolizable energy, which is presented as kcal/100 g FW.

Table 3 presents the mineral profiles of the fruits of *P. psychotrioides* in relation to the mineral concentrations of the soil where this plant grows, which may allow the identification of patterns of selective accumulation. Although the soil presented elevated levels of some minerals, such as phosphorus, potassium and iron, these increases were not proportionally reflected in the mineral content of the fruit. Previous studies have suggested that plants can selectively accumulate certain minerals in their tissues independent of the high concentrations of these minerals in the soil, probably because physiological mechanisms that regulate mineral

uptake, translocation, and accumulation are influenced by factors such as ion bioavailability, element competition in roots, and specific metabolic needs (Karley y White, 2009; Yamamoto et al., 2024).

Table 3. Mineral contents of *P. psychotrioides* and other capulín species.

Cuadro 3. Contenido mineral de *P. psychotrioides* y de otras especies de capulín.

Mineral	Soil analysis	<i>P. psychotrioides</i>	<i>A. compressa</i>	<i>P. serotina</i>
P	833.19±201.53	66.04±5.22	30	28.10±0.40
K	2429.85±131.15	785.73±43.07	328	184.30±3.50
Ca	377.84±27.81	9.86±0.35	41	12.90±1.90
Mg	1023.39±5.93	70.59±1.97	35	21.20±0.20
Fe	5396.04±480.65	5.55±0.34	3.4	-----
Zn	52.38±5.07	4.65±0.54	0.07	-----
Mn	179.94±27.62	0.40±0.03	0.24	-----
Cu	10.51±2.04	0.085±0.002	-----	-----
Reference	Present study	Present study	Joaquín-Cruz et al. (2015)	Luna-Vázquez et al. (2013)

Values are expressed as mg/100 g fresh weight (FW), except for soil analysis, which is reported on a dry weight basis (mg/100 g DW). A long dash (—) indicates data not reported in the cited source.

The results indicated that *P. psychotrioides* fruits are an outstanding source of potassium (K), with 2.4 times that in *A. compressa* fruits and 4.3 times that in *P. serotina* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013) even double that in bananas (358 mg/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025), one of the main reference fruits for this mineral, which regulates blood pressure and heart rate (Razzaque y Wimalawansa, 2025). The phosphorus (P) content in *P. psychotrioides* fruits was also 2.2 times higher than that in *A. compressa* fruits and 2.35 times higher than that in *P. serotina* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013) and exceeding that in other fruits such as guava (40 mg/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025). This mineral plays a fundamental role in the growth and development of bones and teeth and contributes to blood pH regulation and energy storage (Razzaque y Wimalawansa, 2025). In contrast, the calcium content of *P. psychotrioides* fruits

is limited considering calcium availability in the soil, indicating its low accumulation efficiency in the fruit. Although the calcium content recorded for *P. psychotrioides* fruits was lower than that reported for *A. compressa* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015), it was within the typical range for fruits such as strawberries (17 mg/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025). The magnesium (Mg) content of *P. psychotrioides* fruits was twice that of *A. compressa* fruits and 3.3 times greater than that of *P. serotina* fruits (Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013). This mineral is important for energy metabolism and protein synthesis and contributes to cardiovascular health (Razzaque y Wimalawansa, 2025). Although the iron content of *P. psychotrioides* fruits was considerably lower than that of the soil, it was triple that of *A. compressa* fruits and even exceeded that of foods traditionally rich in this mineral, such as spinach, being 5.3 times higher (1.05 mg/100 g FW) (U.S. Department of Agriculture, 2025). This result is important for populations at risk of anemia, since a 100 g serving of this fruit would include 39 % of the recommended daily intake of iron (14 mg/day) (Official Journal of the European Union, 2011). The zinc content in *P. psychotrioides* fruits was higher than that reported for *A. compressa*, and comparable to that of avocado (0.46 mg/100 g FW). However, it remained substantially lower than the levels typically found in nuts (5.07 mg/100 g FW), which are well recognized for their high zinc content (U.S. Department of Agriculture, 2025). Zinc is essential for immunological and enzymatic functions (Razzaque y Wimalawansa, 2025), and this concentration represents 46 % of the recommended daily intake (10 mg/day) (Official Journal of the European Union, 2011). Although manganese and copper are present at relatively low concentrations in *P. psychotrioides* fruits, they contribute to the complete mineral profile of the fruit. These findings suggest that the edaphic characteristics of the ecosystem where *P. psychotrioides* grows positively influence its nutritional profile (Karley y White, 2009; Yamamoto et al., 2024) and, in this sense, the mineral richness of the soil seems to favor the accumulation of essential nutrients in the fruit.

The levels of heavy metals in *P. psychotrioides* fruits were compared with the maximum values allowed by the Codex Alimentarius for fruits and fruit juices (FAO

y WHO, 2001). Notably, the concentrations of cadmium (0.01 mg/kg), arsenic (0.01 mg/kg), mercury (0.00 mg/kg), cobalt (0.04 mg/kg), chromium (0.85 mg/kg) and nickel (0.084 mg/kg) were found to be below the reference values, indicating low toxicological risks. With respect to lead, although its concentration in the edible fraction (0.33 mg/kg) exceeded the maximum limit for fruit juices (0.05 mg/kg), regular consumption of the whole fruit does not present a significant risk. This is because ingesting the tolerable daily intake of lead, determined by the FAO/WHO, would require the consumption of 221.94 g of whole fruit (810 fruits) per day to pose a risk. Furthermore, the limit referred to applies to processed juices (higher volumetric consumption), not to fresh fruit.

4.3.5 Functional compounds

Table 4 shows that the phenolic content of *P. psychotrioides* fruits is higher than that of different commercial blueberry varieties (*Vaccinium corymbosum*) and falls within the range reported for wild species (*Vaccinium myrtillus*). It also exceeds the levels recorded in *P. serotina* fruits. However, the phenolic content of *P. psychotrioides* is 2.2-fold lower than that reported for *A. compressa* fruits (Giovanelli y Buratti, 2009; Joaquín-Cruz et al., 2015; Luna-Vázquez et al., 2013) and remains below the values described for certain strawberry cultivars (1150 ± 50 mg/100 g FW) (Dragišić Maksimović et al., 2015).

The flavonoid content of *P. psychotrioides* fruits was similar to that observed in *P. serotina* fruits and comparable to the highest values reported for plum cultivars (237 ± 6.3 mg CE/100 g FW) [26]. When compared with blueberries, the flavonoid content of *P. psychotrioides* was 1.9 times greater than that reported for *V. corymbosum* var. Bluecrop and 1.79 times greater than that of the wild blueberry *V. myrtillus* (Giovanelli and Buratti, 2009); however, these values were expressed as quercetin equivalents (QE), which may limit direct quantitative comparisons (Bunea et al., 2011). Additionally, the dry weight (DW) equivalence of condensed tannins (1073 ± 53 mg CE/100 g DW) was within the range reported for wild and cultivated blueberries (1110 ± 500 to 1430 ± 140 mg CE/100 g DW), among which wild varieties contain more condensed tannins (Hellström et al., 2024).

The anthocyanin content of *P. psychotrioides* fruits was slightly higher than that of commercial blueberries but lower than that of wild blueberries (Table 4). Moreover, it was markedly lower than the levels reported for *A. compressa* fruits (Giovanelli y Buratti, 2009; Joaquín-Cruz et al., 2015), but considerably higher than the values reported for strawberry (29.29 ± 3.23 mg/100 g FW) (Pineli et al., 2011). In *P. psychotrioides* fruits, approximately 79 % of the total phenolic compounds were comprised of flavonoids and condensed tannins. Of these, anthocyanins constituted 36.49 % of the total phenolic compounds and 83.12 % of the total flavonoids. Flavonoids, condensed tannins or proanthocyanidins and anthocyanins are recognized for their antioxidant and anti-inflammatory properties and contribute to the prevention of chronic diseases and the maintenance of general health. Additionally, proanthocyanidins are responsible for the astringent taste of fruits and act as a defense against pathogens and herbivores (Nile y Park, 2014).

The values shown in Table 4 indicate that the fruits of *P. psychotrioides* had high antioxidant capacity according to the ABTS, FRAP, and DPPH assays. In the ABTS test, the antioxidant capacity of *P. psychotrioides* was higher than that of *A. compressa* (Joaquín-Cruz et al., 2015). According to Bunea et al. (2011), the value obtained for *P. psychotrioides* exceeds the range of wild blueberries (*V. myrtillus*, 4308–5665 $\mu\text{mol TE}/100$ g PF) and is considerably higher than that of commercial cultivars of *V. corymbosum* (2433–3796 $\mu\text{mol TE}/100$ g PF). In the FRAP method, the reducing capacity of *P. psychotrioides* exceeded that of commercial blueberry varieties and *P. serotina*, although it was lower than that of wild blueberries. This antioxidant capacity is similar to that of red cabbage, with values of 5420 ± 260 $\mu\text{mol TE}/100$ g FW (ABTS) and 3060 ± 150 $\mu\text{mol TE}/100$ g FW (FRAP), but it is below those of acerola (*Malpighia emarginata*), reported to be 49400 ± 1100 $\mu\text{mol TE}/100$ g FW (ABTS) and 43400 ± 3500 $\mu\text{mol TE}/100$ g FW (FRAP) (Nilsson et al., 2005).

In the DPPH assay, the values obtained for *P. psychotrioides* were higher than those for *P. serotina* and the ranges reported for commercial and wild blueberries

(Table 4). Expressed as IC₅₀, the value was 55.71 ± 1.17 µg/mL (445.73 ± 9.39 ng/nM DPPH), indicating that a low concentration of extract is required to inhibit 50 % of the radical. This value is considerably lower than those recorded for blackberry (280 µg/mL), raspberry (760 µg/mL), and blackcurrant (200 µg/mL) (Zorzi et al., 2020), suggesting the high efficiency of *P. psychotrioides* as a free radical scavenger.

Overall, the results show that the antioxidant capacity of *P. psychotrioides* does not depend solely on the total phenol content, as this was lower than that of *A. compressa* and wild blueberries (Table 4). This suggests that its antioxidant efficacy may depend more on the structural characteristics and reactivity of its phytochemical compounds than on their total concentration (Moazzen et al., 2022).

When the levels of total phenols, flavonoids, and anthocyanins and the antioxidant capacity of wild and commercial blueberry varieties were compared (Bunea et al., 2011; Giovanelli y Buratti, 2009), the wild fruits tended to have higher concentrations, which was also found in other studies comparing wild and commercial fruit varieties (Cosmulescu et al., 2017; Drózdź et al., 2017; Hellström et al., 2024). This may be explained by the environmental stress to which these plants are exposed in their natural environment, which stimulates the synthesis of secondary metabolites (Cosmulescu et al., 2017). However, the differences observed between individuals of the same species can be attributed to genetic, edaphoclimatic and agronomic management factors, making it difficult to standardize their functional profiles (Pinto et al., 2022).

Table 4. Functional components of the fruits of *P. psychotrioides* and other capulín species.

Cuadro 4. Componentes funcionales de los frutos de *P. psychotrioides* y de otras especies de capulín.

Component	<i>P. psychotrioides</i>	<i>A. compressa</i>	<i>P. serotina</i>	<i>V. corymbosum</i> (commercial)	<i>V. myrtillus</i> (wild)
Total phenols	475.35±11.68	1051.3±43.5	362.2±11.6	251-310	577-614
Flavonoids	208.72±7.52	-----	201.8±12.1	-----	-----
Anthocyanins	173.50±2.15	796.0±2.3	-----	92-129	330-344
Condensed tannins	166.94±8.25	-----	-----	-----	-----
ABTS	5636.21±273.02	4488±4.47	-----	-----	-----
FRAP	3395.45±151.17	-----	1455.2±92.5	2130-2640	5320-5720
DPPH	3218.11±17.63	-----	2056.7±108	379-549	1079-1096
Source	Present study	Joaquín-Cruz et al. (2015)	Luna-Vázquez et al. (2013)	Giovanelli y Buratti (2009)	Giovanelli y Buratti (2009)

Antioxidant capacity: ABTS, FRAP and DPPH ($\mu\text{mol TE}/100\text{ g FW}$), total phenols ($\text{mg GAE}/100\text{ g FW}$), total flavonoids and condensed tannins ($\text{mg CE}/100\text{ g FW}$) and anthocyanins ($\text{mg C3G}/100\text{ g FW}$). A long dash (—) indicates data not reported in the cited source.

4.4 Conclusions

P. psychotrioides is a wild plant that produces fruits with an exceptional nutritional profile. They are characterized by their high carbohydrate content, moderate protein and dietary fiber content, and significant levels of essential minerals, including potassium, phosphorus, magnesium, iron, and zinc. They also have a high concentration of phenolic compounds and notable antioxidant capacity. This suggests that they could be considered a functional food that could improve the nutritional quality of rural and indigenous communities. The results underscore the importance of promoting the sustainable use and biotechnological valorization of underutilized native plant resources. Furthermore, this study emphasizes the importance of recognizing local wild fruits as valuable resources for food security, public health, and biocultural conservation.

4.5 References

- Ahmed, S. y Warne, T. y Stewart, A. y Byker Shanks, C. y Dupuis, V. (2022). Role of Wild Food Environments for Cultural Identity, Food Security, and Dietary Quality in a Rural American State. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.774701>
- Alemán-Villa, D. y Torres-Aquino, M. y Peredo-Rivera, E. y Tovar-Robles, C. y Delgado-Alvarado, A. (2024). Physicochemical characterization of four varieties of prickly pear (*Opuntia* spp.). *Agro Productividad*, 17(2), 167–173. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.348099>
- AOAC - Association of Official Analytical Chemists. (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC International*.
- Benzie, I. y Ceba, J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Bett-Garber, K. L. y Lea, J. M. y Watson, M. A. y Grimm, C. C. y Lloyd, S. W. y Beaulieu, J. C. y Stein-Chisholm, R. E. y Andrzejewski, B. P. y Marshall, D. A. (2015). Flavor of Fresh Blueberry Juice and the Comparison to Amount of Sugars, Acids, Anthocyanidins, and Physicochemical Measurements. *Journal of Food Science*, 80(4), S818–S827. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12821>
- Brand-Williams, W. y Cuvelier, M. E. y Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Bunea, A. y Rugină, D. y Pinteă, A. y Sconța, Z. y Bunea, C. y Socaciu, C. (2011). Comparative Polyphenolic Content and Antioxidant Activities of Some Wild and Cultivated Blueberries from Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 39(2), 70–76. www.notulaebotanicae.ro
- Cosmulescu, S. y Trandafir, I. y Nour, V. (2017). Phenolic acids and flavonoids profiles of extracts from edible wild fruits and their antioxidant properties. *International Journal of Food Properties*, 20(12), 3124–3134. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1274906>
- Dragišić Maksimović, J. y Poledica, M. y Mutavdžić, D. y Mojović, M. y Radivojević, D. y Milivojević, J. (2015). Variation in Nutritional Quality and Chemical Composition of Fresh Strawberry Fruit: Combined Effect of Cultivar and Storage. *Plant Foods for Human Nutrition*, 70(1), 77–84. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0464-3>
- Drózdź, P. y Šežienė, V. y Pyrzynska, K. (2017). Phytochemical Properties and Antioxidant Activities of Extracts from Wild Blueberries and Lingonberries. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72(4), 360–364. <https://doi.org/10.1007/s11130-017-0640-3>

- Dwivedi, S. L. y Lammerts van Bueren, E. T. y Ceccarelli, S. y Grando, S. y Upadhyaya, H. D. y Ortiz, R. (2017). Diversifying Food Systems in the Pursuit of Sustainable Food Production and Healthy Diets. *Trends in Plant Science*, 22(10), 842–856. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.06.011>
- FAO y WHO. (2001). *Report of the Thirty-third Session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants*.
- Felts, M. y Threlfall, R. y Worthington, M. (2019). Physicochemical and descriptive sensory analysis of arkansas-grown peaches and nectarines. *HortScience*, 54(2), 226–235. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13306-18>
- Fernandes, A. M. y Franco, C. y Mendes-Ferreira, A. y Mendes-Faia, A. y Costa, P. L. da y Melo-Pinto, P. (2015). Brix, pH and anthocyanin content determination in whole Port wine grape berries by hyperspectral imaging and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.013>
- GBIF Backbone Taxonomy. (n.d.). *Parathesis psychotrioides* Lundell in GBIF Secretariat. Retrieved January 9, 2025, from <https://www.gbif.org/es/species/3722099>
- Giovanelli, G. y Buratti, S. (2009). Comparison of polyphenolic composition and antioxidant activity of wild Italian blueberries and some cultivated varieties. *Food Chemistry*, 112(4), 903–908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.06.066>
- Glew, R. S. y Vanderjagt, D. J. y Chuang, L. T. y Huang, Y. S. y Millson, M. y Glew, R. H. (2005). Nutrient content of four edible wild plants from West Africa. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60(4), 187–193. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-8616-0>
- Hellström, J. y Karhu, S. y Karhu, J. y Järvenpää, E. y Välimaa, A. L. (2024). Phenolic profiles differentiate wild bilberry and cultivated blueberry fruit. *LWT*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116080>
- Hernández-Rodríguez, G. y Espinosa-Solares, T. y Hernández-Eugenio, G. y Villa-García, M. y Reyes-Trejo, B. y Guerra-Ramírez, D. (2016). Influence of Polar Solutions on the Extraction of Phenolic Compounds from Capulín Fruits (*Prunus serotina*). *Journal of the Mexican Chemical Society*, 60(2), 133–1108. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v60i2.76>
- Hill, J. F. (2013). Observations on the Ash of Plants. In T. de Saussure (Ed.), *Chemical Research on Plant Growth: A translation of Théodore de Saussure's Recherches chimiques sur la Végétation* (pp. 103–153). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4136-6_9
- Hopper, Z. y Desbrow, B. y Roberts, S. y Irwin, C. G. (2024). Beverage sample preparation and procedures for bomb calorimetry: Establishing equivalency in methods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 128. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106033>

- Iordache, A. M. y Nechita, C. y Voica, C. y Roba, C. y Botoran, O. R. y Ionete, R. E. (2022). Assessing the Health Risk and the Metal Content of Thirty-Four Plant Essential Oils Using the ICP-MS Technique. *Nutrients*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/nu14122363>
- Jabeen, S. y Arshad, F. y Harun, N. y Waheed, M. y Alamri, S. y Haq, S. M. y Vitasović-Kosić, I. y Fatima, K. y Chaudhry, A. S. y Bussmann, R. W. (2024). Folk Knowledge and Perceptions about the Use of Wild Fruits and Vegetables—Cross-Cultural Knowledge in the Pipli Pahar Reserved Forest of Okara, Pakistan. *Plants*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/plants13060832>
- Jamali, V. y Emamifar, A. y Beiginejad, H. y Moradi, M. y Rasouli, M. (2024). Enhancing grape freshness and quality with nano zinc oxide coating: a study on post-harvest preservation and grape molasses. *Journal of Food Measurement and Characterization*. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02934-8>
- Jayasena, V. y Cameron, I. (2008). °Brix/acid ratio as a predictor of consumer acceptability of crimson seedless table grapes. *Journal of Food Quality*, 31(6), 736–750. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2008.00231.x>
- Joaquín-Cruz, E. y Dueñas, M. y García-Cruz, L. y Salinas-Moreno, Y. y Santos-Buelga, C. y García-Salinas, C. (2015). Anthocyanin and phenolic characterization, chemical composition and antioxidant activity of chagalapoli (*Ardisia compressa* K.) fruit: A tropical source of natural pigments. *Food Research International*, 70, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.033>
- Karley, A. J. y White, P. J. (2009). Moving cationic minerals to edible tissues: potassium, magnesium, calcium. In *Current Opinion in Plant Biology* (Vol. 12, Issue 3, pp. 291–298). <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.013>
- Kubola, J. y Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127(3), 1138–1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115>
- Lascurain, M. y Avendaño, S. y del Amo, S. y Niembro, A. (2010). *Guía de frutos silvestres comestibles en Veracruz*. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal, Conafor-Conacyt.
- Lasso García, C. y German Bermúdez, F. A. y Vanden Berghe, W. y Gabriela Zurita-Benavides, M. y Orellana-Manzano, A. (2024). Fermented beverages among indigenous Latin American societies. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1390162>
- Lee, J. y Durst, R. y Wrolstad, R. y Eisele, T. y Giusti, M. y Hach, J. y Hofsommer, H. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC International*, 88(5), 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>

- Luna-Vázquez, F. J. y Ibarra-Alvarado, C. y Rojas-Molina, A. y Rojas-Molina, J. I. y Yahia, E. M. y Rivera-Pastrana, D. M. y Rojas-Molina, A. y Zavala-Sánchez, M. Á. (2013). Nutraceutical value of black cherry *prunus serotina* ehrh. Fruits: Antioxidant and antihypertensive properties. *Molecules*, 18(12), 14597–14612. <https://doi.org/10.3390/molecules181214597>
- Mahapatra, A. K. y Panda, P. C. (2012). Wild edible fruit diversity and its significance in the livelihood of indigenous tribals: Evidence from eastern India. *Food Security*, 4(2), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0186-z>
- Mahmood, N. D. y Nasir, N. L. M. y Rofiee, M. S. y Tohid, S. F. M. y Ching, S. M. y Teh, L. K. y Salleh, M. Z. y Zakaria, Z. A. (2014). Muntingia calabura: A review of its traditional uses, chemical properties, and pharmacological observations. In *Pharmaceutical Biology* (Vol. 52, Issue 12, pp. 1598–1623). Informa Healthcare. <https://doi.org/10.3109/13880209.2014.908397>
- Martinez, A. A. y Panuska, C. y Kurina-Sanz, M. y Rinaldoni, A. N. y Orden, A. A. (2023). Undifferentiated Cells of *Tessaria absinthioides* with High Nutritional Value and Health-Promoting Phytochemicals. An Approach Based on Plant Cellular Agriculture. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78(4), 742–747. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01105-2>
- Martinez-Morales, F. y Alonso-Castro, A. J. y Zapata-Morales, J. R. y Carranza-Álvarez, C. y Aragon-Martinez, O. H. (2020). Use of standardized units for a correct interpretation of IC50 values obtained from the inhibition of the DPPH radical by natural antioxidants. *Chemical Papers*, 74(10), 3325–3334. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01161-x>
- Moazzen, A. y Öztinen, N. y Ak-Sakalli, E. y Koşar, M. (2022). Structure-antiradical activity relationships of 25 natural antioxidant phenolic compounds from different classes. *Heliyon*, 8(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10467>
- Nile, S. H. y Park, S. W. (2014). Edible berries: Bioactive components and their effect on human health. *Nutrition*, 30(2), 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2013.04.007>
- Nilsson, J. y Pillai, D. y Önning, G. y Persson, C. y Nilsson, Å. y Åkesson, B. (2005). Comparison of the 2,2'-azinobis-3-ethylbenzotiazoline-6-sulfonic acid (ABTS) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) methods to asses the total antioxidant capacity in extracts of fruit and vegetables. *Molecular Nutrition and Food Research*, 49(3), 239–246. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200400083>
- Official Journal of the European Union. (2011). Regulation (EU) no 1169/2011 of the European parliament and of the council of 25 october 2011. In *Official Journal of the European Union*. <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/1169/oj>
- Pathania, S. y Itle, R. A. y Chávez, C. R. y Lema, L. F. y Caballero-Serrano, V. y Carrasco, J. C. y Chavez, D. J. (2022). Fruit Characterization of *Prunus*

serotina subsp. capuli. *Horticulturae*, 8(9).
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8090838>

- Pereira, G. A. y Ferreira Tomé, P. H. y Arruda, H. S. y Fragiorge, E. J. y Ribeiro, P. R. (2016). Physicochemical characterization and antioxidant activity of Calabura fruit (*Muntingia calabura* L.). *Brazilian Journal of Food Research*, 7(2), 67–79. <https://doi.org/10.3895/rebrapa.v7n2.3526>
- Pineli, L. de L. de O. y Moretti, C. L. y dos Santos, M. S. y Campos, A. B. y Brasileiro, A. V. y Córdova, A. C. y Chiarello, M. D. (2011). Antioxidants and other chemical and physical characteristics of two strawberry cultivars at different ripeness stages. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.05.004>
- Pinto, A. A. y Fuentealba-Sandoval, V. y López, M. D. y Peña-Rojas, K. y Fischer, S. (2022). Accumulation of delphinidin derivatives and other bioactive compound in wild maqui under different environmental conditions and fruit ripening stages. *Industrial Crops and Products*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115064>
- Plants of the World Online. (2025, June 10). *Royal Botanic Gardens, Kew*. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>
- Razzaque, M. S. y Wimalawansa, S. J. (2025). Minerals and Human Health: From Deficiency to Toxicity. In *Nutrients* (Vol. 17, Issue 3). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/nu17030454>
- Re, R. y Pellegrini, N. y Proteggente, A. y Pannala, A. y Yang, M. y Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Redding, M. y Bolten, S. y Gu, G. y Luo, Y. y Micallef, S. A. y Millner, P. y Nou, X. (2023). Growth and inactivation of *Listeria monocytogenes* in sterile extracts of fruits and vegetables: Impact of the intrinsic factors pH, sugar and organic acid content. *International Journal of Food Microbiology*, 386, 110043. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.110043>
- Ricketson, J. M. y Pipoly, J. J. (2008). A new species of *Parathesis* (Myrsinaceae) from Colombia. *Novon*, 18(2), 241–243. <https://doi.org/10.3417/2006155>
- Rios-Corripio, G. y Welti-Chanes, J. y Rodríguez-Martínez, V. y Guerrero-Beltrán, J. Á. (2024). High hydrostatic pressure processing of fresh juice and a fermented beverage of black cherry (*Prunus serotina*). *Journal of Agriculture and Food Research*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100937>
- Sánchez-Peña, M. J. y Martínez-Navarro, A. G. y Márquez-Sandoval, F. y Gutiérrez-Pulido, H. y Pacheco-Moisés, F. P. y González-Ortiz, L. J. (2020). Heats of combustion of the main carbohydrates contained in plant-source foods. *Nutrition Reviews*, 78(5), 382–393. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuz063>

- Singleton, V. y Rossi, J. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Smółka-Danielowska, D. y Jabłońska, M. (2022). Chemical and mineral composition of ashes from wood biomass combustion in domestic wood-fired furnaces. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(6), 5359–5372. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03506-9>
- Sosa, A. V. y Povilonis, I. S. y Borroni, V. y Pérez, E. y Radice, S. y Arena, M. E. (2025). Unveiling the Potential of Southern Elderberry (*Sambucus australis*): Characterization of Physicochemical Properties, Carbohydrates, Organic Acids and Biophenols. *Plant Foods for Human Nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 80(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01288-2>
- U.S. Department of Agriculture. (2025). *FoodData Central Food Search*. <https://fdc.nal.usda.gov/food-search?type=Foundation&query=>
- Wallace, T. C. y Giusti, M. M. (2010). Evaluation of Parameters that Affect the 4-Dimethylaminocinnamaldehyde Assay for Flavanols and Proanthocyanidins. *Journal of Food Science*, 75(7), C619–C625. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01734.x>
- Wrick, K. L. y Robertson, J. B. y Van Soest, P. J. y Lewis, B. A. y Rivers, J. M. y Roe, D. A. y Hackler, L. R. (1983). The Influence of Dietary Fiber Source on Human Intestinal Transit and Stool Output. *The Journal of Nutrition*, 113(8), 1464–1479. <https://doi.org/10.1093/jn/113.8.1464>
- Wrolstad, R. y McDaniel, M. y Durst, R. y Micheals, N. y Lampi, K. y Beaudry, E. (1993). Composition and sensory characterization of red raspberry juice concentrated direct-osmosis or evaporation. *Journal Of Food Science*, 58(3), 633–637. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04344.x>
- Yamamoto, T. y Kashiwara, K. y Furuta, T. y Zhang, Q. y Yu, E. y Ma, J. F. (2024). Genetic background influences mineral accumulation in rice straw and grains under different soil pH conditions. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66036-7>
- Zorzi, M. y Gai, F. y Medana, C. y Aigotti, R. y Morello, S. y Peiretti, P. G. (2020). Bioactive compounds and antioxidant capacity of small berries. *Foods*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/foods9050623>

5 ELABORACIÓN DE UNA BEBIDA FERMENTADA A BASE DE FRUTOS DE *Parathesis psychotrioides*

Resumen

El capulín del monte (*Parathesis psychotrioides*) es un fruto silvestre de relevancia cultural y culinaria para algunas comunidades totonacas de la Sierra Norte de Puebla. Sin embargo, su alta perecibilidad ocasiona pérdidas considerables durante la cosecha. El presente estudio evaluó la fermentación alcohólica como estrategia para conservar y valorizar los frutos de *P. psychotrioides*. Se elaboró un mosto con 21 °Brix y pH 3.4, sometido a fermentación espontánea durante 18 días. Durante el proceso se monitorearon parámetros fisicoquímicos, cinéticas de consumo de azúcar y producción de etanol, así como el contenido de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de la bebida. Los resultados mostraron una disminución progresiva de los sólidos solubles, así como de los azúcares totales y reductores. El consumo de azúcares se ajustó a un modelo de decaimiento exponencial, con una constante de velocidad (k_s) de 0.109 día^{-1} . La fermentación alcanzó $11.65 \pm 1.05 \text{ \% v/v}$ de etanol, con una tasa máxima de producción (r_{pm}) de $0.357 \pm 0.03 \text{ g L}^{-1}\text{h}^{-1}$, de acuerdo con el modelo Gompertz modificado, y un rendimiento global de conversión del $75.3 \pm 3.8 \text{ \%}$. El contenido de fenoles se mantuvo estable ($554.6 \pm 5.5 \text{ mg EAG L}^{-1}$), mientras que los flavonoides y taninos aumentaron significativamente y las antocianinas disminuyeron 66 %. El ensayo FRAP no reveló cambios significativos en la capacidad antioxidante, en tanto que ABTS y CUPRAC mostraron un incremento hasta el día 14 seguido de estabilización. La bebida fermentada presentó alta aceptación sensorial (4.4/5) y cumplió con los criterios de la NOM-199-SCFI-2017. Los resultados indican que la fermentación espontánea permite conservar y valorizar los frutos de *P. psychotrioides*, obteniendo una bebida con potencial nutracéutico y comercial.

Palabras clave: fermentación espontánea, pérdidas poscosecha, valorización de frutos silvestres, frutos endémicos, cinética fermentativa.

PREPARATION OF A FERMENTED BEVERAGE BASED ON THE FRUITS OF *Parathesis psychotrioides*

Abstract

The capulin del monte (*Parathesis psychotrioides*) is a wild fruit of cultural and culinary importance for some Totonac communities in the Sierra Norte de Puebla. However, its high perishability causes considerable losses during harvest. The present study evaluated alcoholic fermentation as a strategy to preserve and add value to the fruits of *P. psychotrioides*. A must with 21 °Brix and pH 3.4 was prepared and subjected to spontaneous fermentation for 18 days. During the process, physicochemical parameters, kinetics of sugar consumption and ethanol production, as well as the content of phenolic compounds and the antioxidant capacity of the beverage were monitored. The results showed a progressive decrease in soluble solids, as well as in total and reducing sugars. Sugar consumption followed an exponential decay model, with a rate constant (k_s) of 0.109 day^{-1} . Fermentation reached $11.65 \pm 1.05\%$ v/v ethanol, with a maximum production rate (rpm) of $0.357 \pm 0.03 \text{ g L}^{-1}\text{h}^{-1}$. Fermentation reached $11.65 \pm 1.05\%$ v/v ethanol, with a maximum production rate (rpm) of $0.357 \pm 0.03 \text{ g L}^{-1}\text{h}^{-1}$, according to the modified Gompertz model, and an overall conversion yield of $75.3 \pm 3.8\%$. The phenol content remained stable ($554.6 \pm 5.5 \text{ mg EAG L}^{-1}$), while flavonoids and tannins increased significantly and anthocyanins decreased by 66%. The FRAP assay revealed no significant changes in antioxidant capacity, while ABTS and CUPRAC showed an increase until day 14, followed by stabilization. The fermented beverage was highly accepted in sensory tests (4.4/5) and met the criteria of NOM-199-SCFI-2017. The results indicate that spontaneous fermentation allows the preservation and valorization of *P. psychotrioides* fruits, obtaining a beverage with nutraceutical and commercial potential.

Keywords: spontaneous fermentation, post-harvest losses, valorization of wild fruits, endemic fruits, fermentation kinetics.

5.1 Introducción

El uso y aprovechamiento de frutos silvestres constituye un elemento fundamental en la relación histórica entre las comunidades humanas y su entorno natural (Ahmed et al., 2022; Jabeen et al., 2024; Mothupi y Shackleton, 2025). Estos recursos han constituido una fuente importante de alimento, además, se han integrado en prácticas culturales y tradicionales que perduran hasta la actualidad (Mahapatra y Panda, 2012; Mutelo et al., 2022). En los últimos años, los frutos silvestres han cobrado interés científico y tecnológico por su contenido de compuestos bioactivos, entre ellos los polifenoles capaces de atrapar radicales libres y funcionar como antioxidantes, y pueden usarse como materias primas con potencial funcional y nutracéutico (Drózdź et al., 2017; Hellström et al., 2024). En este contexto, la fermentación de frutos como arándanos, moras, grosellas y fresas ha demostrado mejorar las propiedades sensoriales, preservar nutrientes y generar bebidas con valor agregado, atractivas tanto en el ámbito local como en mercados especializados (Wu et al., 2021).

El capulín del monte (*Parathesis psychotrioides*) representa un recurso de gran relevancia cultural para la comunidad de Ecatlán, Municipio de Jonotla, Puebla. Es una drupa endémica de sabor dulce y ligeramente ácido que, pese a su importancia cultural, enfrenta serias limitaciones para su aprovechamiento. Entre los principales problemas destacan su corta temporada de fructificación, alta perecibilidad, bajo rendimiento de pulpa y la necesidad de retirar manualmente la semilla, lo que dificulta su procesamiento. Estas condiciones, sumadas al desinterés de las nuevas generaciones y a la ausencia de tecnologías de conservación accesibles, han reducido su valorización y restringido su potencial económico y culinario a un ámbito meramente local.

La fermentación alcohólica surge como una estrategia biotecnológica viable para conservar y transformar el capulín del monte en una bebida con valor agregado. Este proceso, basado en la acción de levaduras y bacterias, no solo prolonga la vida útil de los frutos, sino que también modifica su composición, potenciando el perfil sensorial y preservando los compuestos nutracéuticos (Keş̇a et al., 2021).

Ante el potencial de la fermentación alcohólica para mejorar la estabilidad y el valor nutracéutico del capulín del monte, se planteó como objetivo elaborar una bebida fermentada a partir de capulín del monte y evaluar los cambios fisicoquímicos, el contenido de compuestos bioactivos y la capacidad antioxidante durante el proceso.

5.2 Materiales y métodos

5.2.1 Elaboración de la bebida fermentada

Preparación del inóculo: el pie de cuba se elaboró empleando 417 g de fruta fresca congelada, equivalentes al 21.75 % (m/m) del fruto total destinado a la fermentación (Kaur et al., 2020; Tsegay et al., 2018). La fruta se trituró suavemente para liberar la pulpa sin dañar las semillas, y se incubó en un recipiente estéril a 25 ± 1 °C con agitación constante a 300 rpm durante 72 h en una incubadora orbital de mesa (SEV-PREND0, modelo INO 650M).

Fermentación alcohólica: el mosto se preparó mezclando fruta descongelada, el inóculo y agua en una proporción fruta total:agua de 1:1.2 (m/v) (Wang et al., 2025). El inóculo representó el 10 % (m/m) del peso total de la mezcla (fruta + agua + inóculo). El contenido de sólidos solubles se ajustó a 21.17 ± 0.06 °Brix mediante la adición de sacarosa y el pH a 3.4 ± 0.01 con ácido tartárico. Las semillas y cáscaras se mantuvieron en el mosto para favorecer la extracción de compuestos durante la fermentación. La fermentación se llevó a cabo por triplicado, bajo condiciones anaeróbicas, a 25 ± 1 °C en recipientes de plástico de 6 L provistos de trampas de aire. La fracción sólida flotante se sumergió manualmente dos veces al día para evitar el crecimiento de moho y facilitar la extracción de compuestos. La fermentación se consideró finalizada cuando se observó la estabilización de los °Brix, el hundimiento del sombrero (cáscaras y semillas) y la ausencia de liberación de gas en la trampa de aire, lo cual ocurrió a los 16 días.

Clarificación, estabilización y embotellado: El producto fermentado se trasegó por sifonado utilizando un embudo con algodón para eliminar las partículas sólidas. La acidez titulable determinada por titulación potenciométrica se ajustó a 7 g L^{-1} de ácido tartárico mediante la adición controlada de carbonato de calcio, aplicando un procedimiento estequiométrico para la neutralización parcial del ácido. Posteriormente, la bebida se refrigeró a $4 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 72 h para promover la precipitación de sales tartáricas, seguido de un segundo trasiego para separar el sobrenadante. Finalmente, el contenido de sólidos solubles se ajustó a $12 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{Brix}$ con sacarosa, y se añadió 150 mg L^{-1} de metabisulfito de potasio para prevenir una segunda fermentación en botella (Li y Mira de Orduña, 2020). La bebida se embotelló y se almacenó para su conservación.

5.2.2 Procesamiento de las muestras

Se recolectaron 15 mL de mosto cada dos días durante el proceso fermentativo. Las determinaciones de sólidos totales solubles (SST), pH y acidez titulable (AT) se realizaron inmediatamente después del muestreo (Felts et al., 2019; Sosa et al., 2025). Posteriormente, las muestras se almacenaron a $-18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta la finalización de la fermentación para su análisis conjunto. Para el análisis, las muestras se descongelaron en refrigeración y se centrifugaron a $7,120 \times g$ durante 10 min a $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en una centrífuga OHAUS Frontier FC-5718-R, para separar la fracción líquida del sedimento. A partir del sobrenadante se cuantificaron los azúcares totales, azúcares reductores, etanol, fenoles totales, flavonoides totales, antocianinas totales, taninos condensados y la capacidad antioxidante mediante los ensayos FRAP, ABTS y CUPRAC.

5.2.3 Caracterización química

Acidez titulable (AT) y pH: las muestras de mosto se titularon con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N hasta alcanzar un pH de 8.2. La medición del pH se realizó con un potenciómetro Conductronic pH120. La acidez se expresó como gramos equivalentes de ácido tartárico por litro de mosto ($\text{g ácido tartárico L}^{-1}$) (Felts et al., 2019; Sosa et al., 2025).

Sólidos solubles totales (SST): se analizó con un refractómetro digital (ATAGO PAL-1) en grados Brix (°Brix) (Sosa et al., 2025).

Azúcares solubles totales (AST): la concentración de azúcares totales se determinó utilizando el método fenol-sulfúrico (Dubois et al., 1956). La curva de calibración se preparó a partir de una solución patrón de glucosa en un rango de concentraciones de 30.0 a 966.0 mg L⁻¹. El coeficiente de determinación (R²) obtenido fue de 0.9928. Los resultados se expresaron como gramos equivalentes de glucosa por litro (g EG L⁻¹).

Azúcares reductores (AR): la concentración de azúcares reductores se determinó utilizando el método de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) descrito por Miller (1959). La curva de calibración se preparó a partir de una solución patrón de glucosa en un rango de concentraciones de 30.0 a 455.0 mg de glucosa L⁻¹. El coeficiente de determinación (R²) obtenido fue de 0.997. Los resultados se expresaron como gramos equivalentes de glucosa por litro (g EG L⁻¹).

Etanol: la concentración de etanol se determinó mediante extracción del etanol en la muestra con TBP (fosfato de tri-n-butilo) seguido de la oxidación por dicromato de potasio 10 % m/v (Sayyad et al., 2015). Se prepararon diluciones a partir de una solución patrón de etanol en un rango de concentraciones de 7,863.0 a 70,771.0 mg de etanol L⁻¹. El modelo lineal obtenido mostró un coeficiente de determinación (R²) de 0.9915. Los resultados se expresaron como gramos de equivalentes de etanol por litro (g EE L⁻¹).

5.2.4 Modelado cinético del proceso fermentativo

Consumo de sustrato: el consumo de azúcares durante la fermentación se describió mediante una función de decaimiento exponencial propuesta por Tronchoni et al. (2009), como se muestra en la Ecuación (1).

$$S(t) = S_{res} + S_{\Delta} \cdot e^{-k_s t} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde $S(t)$ representa la concentración de azúcar (g EG L⁻¹) en el tiempo t (días desde el inicio de la fermentación), S_{res} corresponde a la concentración de azúcar cuando $t \rightarrow \infty$ (g EG L⁻¹), S_{Δ} indica la cantidad total de azúcar consumida durante la fermentación (g EG L⁻¹), y k_s es la constante de velocidad de consumo de azúcar (día⁻¹).

A partir del modelo ajustado, se estimaron el tiempo requerido para consumir el 50 % de la concentración inicial de azúcares, y el tiempo teórico necesario para el agotamiento total del azúcar presente al inicio de la fermentación.

Producción de alcohol: se utilizó la ecuación de Gompertz modificada (Ecuación (2)) para describir la producción de etanol durante la fermentación (Phukoetphim et al., 2017a).

$$P(t) = P_{max} \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{r_{pm} \cdot \exp(1)}{P_{max}} \right) (t_L - t) + 1 \right] \text{ Ecuación (2)}$$

Donde $P(t)$ representa la concentración de etanol (g EE L⁻¹) producida en el tiempo t (días desde el inicio de la fermentación), P_{max} corresponde al máximo contenido alcohólico alcanzable (g EE L⁻¹), r_{pm} indica la tasa máxima de producción de etanol (g EE L⁻¹ día⁻¹), y t_L es la fase de latencia o tiempo desde el comienzo de la fermentación hasta la producción exponencial de etanol (días).

Rendimiento global de conversión de alcohol: El rendimiento de producción de etanol se calculó en dos etapas. Primero, se estimó la cantidad teórica máxima de etanol que podría generarse por unidad de azúcar consumida, de acuerdo con la (Ecuación (3)). Posteriormente, se determinó el rendimiento real como la relación entre la cantidad de etanol producida al final de la fermentación y el valor teórico calculado (Ecuación (4)), de acuerdo con el procedimiento descrito por Bezerra et al. (2024).

$$RT = S_{\Delta} \times 0.511 \text{ Ecuación (3)}$$

$$RA = \frac{A_f}{RT} \text{ Ecuación (4)}$$

Donde RT representa el rendimiento teórico de producción de etanol (g L^{-1}), S_{Δ} la cantidad total de azúcar consumida durante la fermentación (g EG L^{-1}), RA el rendimiento real de producción de etanol (%), y A_f la concentración de etanol al final de la fermentación (g EE L^{-1}).

Criterios de selección de los modelos: ambos modelos cinéticos (consumo de sustrato y producción de alcohol) fueron ajustados por regresión no lineal mediante el algoritmo de Levenberg–Marquardt, implementado en el paquete minpack.lm de R (versión 4.4.2). La calidad del ajuste fue evaluada mediante el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Phukoetphim et al., 2017b; Tronchoni et al., 2009).

5.2.5 Evaluación de la dinámica de compuestos bioactivos y su capacidad antioxidante

Fenoles totales: el contenido fenólico se determinó según el método de Singleton y Rossi (1965). La curva de calibración se elaboró a partir de una solución patrón de ácido gálico en un rango de concentraciones de 5.0 a 114 mg L^{-1} . El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9963. Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de ácido gálico por litro (mg EAG L^{-1}).

Taninos condensados (proantocianidinas): la cuantificación de taninos condensados en la muestra se realizó mediante el método de 4-dimetilaminocinnamaldehído (DMAC) (Wallace y Giusti, 2010). Se preparó una curva de calibración utilizando una solución patrón de catequina en un rango de concentraciones de 11.0 a 1,026 mg L^{-1} . El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9986. Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de catequina por litro (mg EC L^{-1}).

Flavonoides totales: el contenido flavonoides totales se determinó siguiendo el método de Kubola y Siriamornpun (2011). La curva de calibración se preparó con a partir de una solución patrón de catequina en un rango de concentraciones de 10.0 a 19.2 mg L⁻¹. El coeficiente de determinación (R²) fue de 0.9956. Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de catequina por litro (mg EC).

Antocianinas monoméricas: la concentración de antocianinas monoméricas se determinó mediante el método de pH diferencial (Lee et al., 2005). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de cianidina-3-O-glucósido por litro (EC3G L⁻¹).

Capacidad antioxidante: la capacidad antioxidante se evaluó mediante los ensayos de FRAP (Benzie y Cega, 1996), ABTS (Re et al., 1999) y CUPRAC (Özyürek et al., 2008). Para los tres métodos se construyó una curva de calibración con trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromo-2-carboxílico) en un rango de concentraciones de 0.50 a 17.52 mg L⁻¹. Los coeficientes de determinación (R²) obtenidos fueron de 0.9962 para FRAP, 0.9974 para ABTS y 0.9976 para CUPRAC. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de trolox por litro (mg ET L⁻¹).

5.2.6 Cumplimiento normativo

Para verificar el cumplimiento de los límites y especificaciones aplicables a las bebidas alcohólicas fermentadas, los análisis se realizaron conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017, Bebidas alcohólicas–Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba (Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017, Bebidas Alcohólicas-Denominación, Especificaciones Fisicoquímicas, Información Comercial y Métodos de Prueba, 2017). Se evaluaron los siguientes parámetros: contenido de alcohol (NMX-V-013-NORMEX-2019. Bebidas Alcohólicas-Determinación Del Contenido Alcohólico (Por Ciento de Alcohol En Volumen a 20 °C) (% Alc. Vol.) - Métodos de Ensayo, 2020), metanol, aldehídos, alcoholes superiores (NMX-V-

005-NORMEX-2018. Bebidas Alcohólicas. - Determinación de Aldehídos, Ésteres, Metanol y Alcoholes Superiores – Métodos de Ensayo, 2019) y furfural (NMX-V-004-NORMEX-2018. Bebidas Alcohólicas – Determinación de Furfural- Métodos de Ensayo, 2020), así como el contenido de plomo y arsénico (NMX-V-050-NORMEX-2010. Bebidas Alcohólicas – Determinación de Metales Como Cobre (Cu), Plomo (Pb), Arsénico (As), Zinc (Zn), Hierro (Fe), Calcio (Ca), Mercurio (Hg), Cadmio (Cd), Por Absorción Atómica – Método de Ensayo, 2011).

5.2.7 Aceptación sensorial

Se llevó a cabo una prueba de aceptación sensorial del producto con la participación de 50 miembros adultos de la comunidad de Ecatlán, Puebla. Los panelistas fueron seleccionados de manera voluntaria y se les proporcionó una explicación previa sobre el procedimiento y el objetivo de la evaluación. La evaluación se llevó a cabo mediante una prueba de aceptabilidad utilizando una escala hedónica de 5 puntos para facilitar la comprensión y participación, donde 1 correspondió a "me disgusta mucho" y 5 a "me gusta mucho". Cada participante evaluó el producto recibiendo porciones individuales en vasos desechables y servidos a temperatura ambiente (Santana et al., 2023).

5.2.8 Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se hicieron en R (versión 4.4.2), y las figuras se generaron en Microsoft Excel 365. La significancia se evaluó mediante un ANOVA de una vía, previa comprobación de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene).

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Cambios químicos durante la fermentación

Los frutos de *P. psychotrioides* utilizados en el proceso fermentativo presentaron 8.93 ± 0.06 °Brix de sólidos solubles, un pH de 3.97 ± 0.06 y una acidez titulable de 1.016 ± 0.02 %, expresada como ácido cítrico. Estos valores indican que, aunque el fruto contiene una cantidad apreciable de azúcares fermentables, su

concentración es insuficiente para alcanzar niveles elevados de etanol al finalizar la fermentación. Por ello, se adicionó sacarosa hasta 21.17 ± 0.06 °Brix, con el fin de aumentar la disponibilidad de sustrato y compensar la dilución de azúcares causada por la incorporación de agua (Jiang et al., 2023).

Diversos estudios han señalado que el contenido de sólidos solubles inicial es un factor crítico en la eficiencia de los procesos fermentativos (Tran Duc Duy y Nguyen Tran Bao Chau, 2024). Por ejemplo, un °Brix inicial inferior a 20 puede derivar en bajos rendimientos de alcohol y en una menor estabilidad microbiológica del producto final (Charansing y Shrivastav, 2025). En contraste, valores excesivamente elevados (>28 °Brix) generan condiciones de estrés osmótico sobre las levaduras, lo que puede disminuir su actividad metabólica y favorecer la producción de subproductos indeseables como alcoholes superiores y ácidos volátiles (Chen et al., 2025; Saito y Posas, 2012).

Asimismo, la adición de ácido tartárico se implementó como una medida preventiva para ajustar la acidez del mosto y limitar el desarrollo de bacterias competitivas (Payan et al., 2023). Este ajuste generó un entorno selectivo que favoreció el crecimiento de las levaduras endógenas, a la vez que redujo el riesgo de contaminación por bacterias acidificantes, como las del género *Acetobacter*, que pueden comprometer la calidad sensorial de la bebida (Payan et al., 2023).

El contenido de sólidos solubles totales (SST) (Figura 7A) mostró una disminución sostenida y estadísticamente significativa ($p < 0.05$) durante el proceso, lo cual constituye un indicador directo del consumo de azúcares por parte de las levaduras endógenas (Charansing y Shrivastav, 2025; Tran Duc Duy y Nguyen Tran Bao Chau, 2024). La estabilización de los valores de SST después de 16 días sugiere: el agotamiento de los sustratos fermentables o la inhibición de la actividad celular debido a la acumulación de etanol, fenómeno conocido como inhibición por producto (Aiba et al., 2000).

La acidez titulable presentó un ligero incremento conforme avanzaba la fermentación (Figura 7B). Este comportamiento puede atribuirse principalmente

a la producción de nuevos ácidos orgánicos como resultado de la actividad metabólica de las levaduras durante la fermentación alcohólica. Las levaduras producen diversos ácidos, principalmente ácido succínico y ácido acético, cuya formación depende de factores como la cepa utilizada, la composición del mosto (especialmente la disponibilidad de nitrógeno), las condiciones de aireación y la temperatura de fermentación (Ferreira y Mendes-Faia, 2020).

A pesar del incremento en la acidez titulable, el pH del mosto se mantuvo relativamente estable durante la fermentación (Figura 7B). Esta estabilidad puede explicarse por una producción poco significativa de ácidos durante la fermentación o por la capacidad amortiguadora de los ácidos orgánicos presentes naturalmente en los frutos y del ácido tartárico añadido para el ajuste inicial de pH, los cuales en conjunto mantienen el pH en un rango relativamente constante incluso cuando se producen nuevos ácidos durante la fermentación (Vion et al., 2024). El pH inicial de 3.4 fue efectivo para crear un entorno selectivo que favoreció la fermentación alcohólica por parte de las levaduras, mientras que inhibió el desarrollo de la mayoría de las bacterias lácticas y acéticas, las cuales requieren valores de pH más elevados para su óptimo crecimiento (Payan et al., 2023). Esto explica por qué no se observaron incrementos pronunciados en la acidez titulable que indicarían una fermentación maloláctica o acética significativa (Payan et al., 2023).

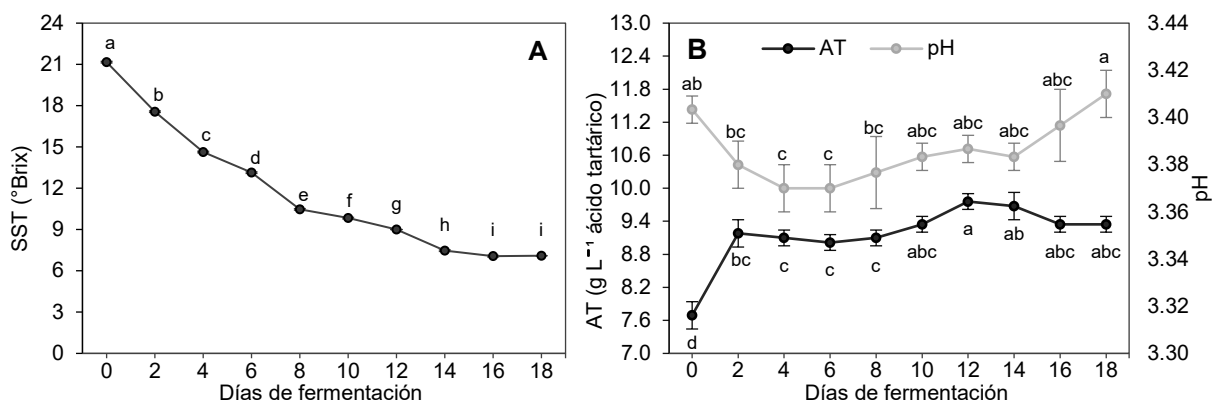


Figura 7. Cambios fisicoquímicos durante el proceso de fermentación alcohólica. A. Evolución de los sólidos solubles totales (SST). B. Variación del pH y la acidez titulable (AT). Los valores representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de fermentación (ANOVA, $p < 0.05$).

5.3.2 Modelado cinético del proceso fermentativo

Cinética de consumo de sustrato

Durante las primeras etapas de fermentación, se observó un incremento transitorio en los azúcares reductores (AR), igualando paulatinamente el contenido de azúcares totales, lo cual se atribuye a la hidrólisis de la sacarosa en glucosa y fructosa, catalizada por la enzima invertasa secretada por las levaduras, dado que estos monosacáridos son los sustratos preferenciales en la glucólisis y en la fermentación alcohólica (Srinivas y Tikku, 2014). La fermentación alcohólica es un proceso bioquímico en el que los azúcares son transformados en etanol y CO_2 por acción de las levaduras, lo que explica la disminución progresiva de la concentración de azúcares en el mosto (Chen et al., 2025; Tran Duc Duy y Nguyen Tran Bao Chau, 2024; Wang et al., 2025). En este estudio, la conversión de azúcares por parte de las levaduras endógenas de *P. psychotrioides* resultó altamente eficiente (Figura 8A).

La función de decaimiento exponencial mostró un buen grado de ajuste a los datos experimentales, con coeficiente de determinación $R^2 = 0.9936$ y un error cuadrático medio $\text{RMSE} = 7.044 \text{ EG L}^{-1}$. Además, el modelo estimó que el tiempo requerido para consumir el 50 % y el 100 % del contenido inicial de azúcares fue de 5.04 y 17.1 días, respectivamente. Estos indicadores sugieren que el modelo describe adecuadamente la dinámica de consumo de azúcares durante la fermentación dentro del intervalo observado (18 días). Sin embargo, el valor estimado del parámetro S_{res} fue de $-52.63 \text{ g EG L}^{-1}$, lo cual difiere del valor experimental de azúcar al finalizar la fermentación (4.14 g EG L^{-1}). Esta diferencia implica, en términos matemáticos, que el modelo predice un consumo superior al total de azúcares disponibles, lo que carece de sentido biológico. Por tanto, el modelo debe interpretarse únicamente como una herramienta descriptiva válida dentro del intervalo temporal analizado, sin extrapolaciones fuera de dicho rango. El consumo de azúcares totales estimados (S_{Δ}) fue de $341.42 \text{ g EG L}^{-1}$,

aproximadamente 50 g EG L⁻¹ superior al consumo observado experimentalmente, lo que también indica que el modelo describe el comportamiento general del consumo sin representar con exactitud los valores extremos. La constante de velocidad cinética (k_s) se estimó en 0.1093 día⁻¹, lo que corresponde a una vida media de 6.3 días, indicando una tasa de consumo relativamente lenta en comparación con levaduras comerciales utilizadas en vinificación, cuyas constantes para el consumo de glucosa oscilaron entre 0.134 y 0.575 día⁻¹ (Tronchoni et al., 2009).

Cinética de producción de alcohol

Se observó una relación inversa entre la producción de etanol y el consumo de azúcares (Figura 8B). La síntesis de etanol se estabilizó hacia el día 14 de fermentación, coincidiendo con el agotamiento de los azúcares en el mosto (Figura 8A) y con la estabilización de los SST (Figura 8A). La concentración final de etanol determinada por el método espectrofotométrico fue de 109.22 ± 1.52 g EE L⁻¹, equivalente a 13.84 ± 0.20 % v/v, valor que se encuentra dentro del rango reportado para vinos de alta graduación alcohólica (12–15 % v/v) (Cehula et al., 2020). Esta elevada concentración de etanol es relevante no solo desde el punto de vista sensorial, sino también como factor de conservación, ya que el etanol inhibe el crecimiento de microorganismos patógenos y de descomposición (Neme et al., 2014).

El modelo de Gompertz modificado aplicado a los datos experimentales mostró un alto grado de ajuste ($R^2 = 0.9895$; RMSE = 3.06 g EE L⁻¹). La producción máxima estimada (P_{max}) fue de 114.31 ± 4.00 g EE L⁻¹, valor similar al obtenido experimentalmente, lo que sugiere una buena tolerancia al etanol por parte de las levaduras endógenas. La tasa máxima de producción (r_{pm}) alcanzó 8.57 ± 0.72 g EE L⁻¹ día⁻¹ (equivalente a 0.357 ± 0.03 g EE L⁻¹ h⁻¹), superior a la reportada por García et al. (2024) en la producción de hidromiel (0.26 g EE L⁻¹ h⁻¹), aunque inferior a la obtenida por Phukoetphim et al. (2017a) en la producción de bioetanol a partir de sorgo con levaduras comerciales (2.088 ± 0.102 g EE L⁻¹ h⁻¹). El valor negativo del parámetro de latencia ($t_L = -2.34 ± 0.54$ días) podría

atribuirse al intervalo de muestreo de dos días, que posiblemente no permitió registrar la fase lag. Además, la corta o ausente fase lag podría deberse a la adaptación previa del inóculo al sustrato, lo que permitió un inicio inmediato de la fermentación.

El rendimiento global de producción de etanol fue de $75.3 \pm 3.8 \%$, superior al reportado para bebidas fermentadas de frambuesa ($49.52 \pm 0.07 \%$), arándano ($64.84 \pm 0.11 \%$) y fresa ($66.31 \pm 0.30 \%$) (Bezerra et al., 2024). Según Basa et al. (2022), las cepas silvestres de *Saccharomyces cerevisiae* suelen presentar menores rendimientos que las cepas comerciales bajo condiciones aerobias (74.4 % y 88.1 %, respectivamente), aunque pueden igualarlas o superarlas bajo condiciones microaerófilas o anaeróbicas, alcanzando entre 92 y 98 % de eficiencia.

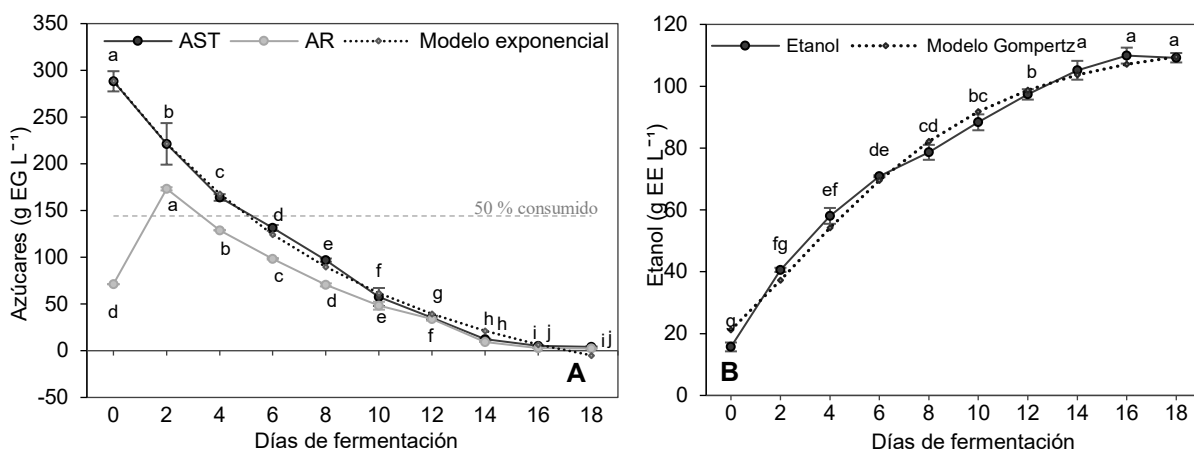


Figura 8. Dinámica de consumo de azúcar y producción de etanol durante el proceso de fermentación alcohólica. A. Consumo de azúcares Totales (AST) y Azúcares Reductores (AR) (g EG L⁻¹). B. Producción de etanol (g EE L⁻¹). Los valores representan la media $\pm$ desviación estándar ($n = 3$). Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de fermentación (ANOVA, $p < 0.05$).

5.3.3 Dinámica de los compuestos funcionales y capacidad antioxidante

Como se muestra en la Figura 9A, la concentración de compuestos fenólicos totales presentó un incremento inicial entre los días 0 y 2, atribuido a la solubilización de compuestos de la cáscara, semilla y pulpa durante la maceración, etapa en la cual se liberan de la matriz celular e incorporan al mosto

(Alencar et al., 2018). Posteriormente, la concentración permaneció estable hasta el día 12, momento a partir del cual se observó un descenso gradual. Esta disminución podría estar asociada a procesos de polimerización y a la formación de pigmentos poliméricos más estables, pero menos solubles, lo que reduce la fracción de fenoles libres y afecta propiedades como el color y la astringencia (Bimpilas et al., 2015; Ruiz-Rodríguez et al., 2021), o bien a la acción de enzimas liberadas por las levaduras durante la fermentación (Bimpilas et al., 2015; Zhang et al., 2021). Aun así, el valor final obtenido (554.58 ± 5.54 mg EAG L⁻¹) fue superior al reportado en otras bebidas fermentadas, como el vino elaborado con grosella blanca y mora de los pantanos (541 mg EAG L⁻¹) (Dou et al., 2022) y la bebida alcohólica de Jabuticaba (431.70 mg EAG L⁻¹) (Figueredo Oliveira Santos et al., 2024).

La concentración de taninos mostró un incremento sostenido hasta el día 6, estabilizándose posteriormente (Figura 9B). Este comportamiento está relacionado con la liberación inicial de estos compuestos desde la piel y las semillas del fruto (Alencar et al., 2018; Zou et al., 2017). En el caso de los flavonoides, la concentración aumentó de manera continua durante los primeros 14 días de fermentación, alcanzando un valor máximo, seguido de una ligera disminución no significativa (Figura 9B). Este comportamiento puede explicarse principalmente por la liberación de compuestos fenólicos desde la matriz sólida de la fruta, favorecida por la degradación de las paredes celulares inducida por las enzimas secretadas por las levaduras durante la fermentación (Alencar et al., 2018; Bimpilas et al., 2015; Zhang et al., 2021). Asimismo, la acción de enzimas específicas, como la β -glucosidasa, contribuye a la ruptura de los enlaces glucosídicos, liberando los flavonoides en su forma aglicona, la cual presenta mayor actividad biológica y biodisponibilidad (Paventi et al., 2025). A esto se suma el incremento progresivo de etanol en el medio fermentativo, que favorece la transferencia de flavonoides y otros compuestos fenólicos desde la matriz vegetal hacia la fase líquida, al aumentar su solubilidad y facilitar su liberación, particularmente en el caso de moléculas menos solubles en agua, como la quercetina (Escudero-López et al., 2013).

En contraste, la concentración de antocianinas disminuyó significativamente a lo largo de la fermentación, con una reducción del 66.1 % respecto al contenido inicial (Figura 9B). Esta pérdida se asocia con la alta inestabilidad de estos pigmentos frente a condiciones fermentativas, influenciada por diversos factores como la acción enzimática de β -glucosidasa producida por las levaduras, que favorece la hidrólisis de glucósidos; la ocurrencia de reacciones químicas que generan compuestos incoloros o derivados menos estables; y la adsorción de antocianinas en las paredes celulares de las levaduras (Bimpilas et al., 2015; Ruiz-Rodríguez et al., 2021; Zhang et al., 2021). Se ha documentado que la presencia de etanol incrementa la velocidad de degradación, reduciendo la estabilidad de las antocianinas y favoreciendo reacciones de hidrólisis y procesos nucleofílicos que destruyen el pigmento (Ma et al., 2018). Estos efectos han sido observados en bebidas fermentadas: en vinos de granada, la pérdida de antocianinas fue cercana al 66.5 % tras la fermentación alcohólica (Berenguer et al., 2016), mientras que en vinos de uva *Cabernet Sauvignon* puede superar el 40 % (Merve et al., 2022). En general, estudios con diferentes especies de levaduras confirman que la disminución de antocianinas es un proceso inevitable y de magnitud significativa, aunque su intensidad depende de la matriz y de las condiciones fermentativas específicas (Bimpilas et al., 2015; Ma et al., 2018).

En la Figura 9C se muestran los cambios en la capacidad Antioxidante del mosto evaluados mediante tres métodos diferentes. La capacidad reductora medida con FRAP se mantuvo relativamente constante durante todo el proceso (promedio $942.55 \pm 25.23 \text{ mg ET L}^{-1}$), lo que sugiere que el potencial del sistema para donar electrones no se modificó de manera significativa. Este comportamiento coincide con la evolución de los fenoles totales, cuyo contenido se mantuvo en niveles elevados a lo largo de la fermentación (Figura 9A). Dado que el ensayo FRAP depende principalmente de la capacidad de compuestos fenólicos con grupos hidroxilo libres para reducir iones férricos a ferrosos, su estabilidad indica que los procesos de degradación de algunos metabolitos (como las antocianinas) pudieron verse compensados por la liberación continua de otros compuestos fenólicos más estables provenientes de la matriz del fruto (Alencar et al., 2018;

Bimpilas et al., 2015; Motta et al., 2025). Los valores de capacidad Antioxidante por el método FRAP fueron superiores a los reportados en vinos de jugo de arándano rojo (*Vaccinium macrocarpon*) y fresa (*Fragaria × ananassa*) (831 y 868 mg ET L⁻¹, respectivamente) pero inferiores a vinos elaborados de jugo de arándano (*Vaccinium myrtillus*), frambuesa (*Rubus idaeus*), zarzamora (*Rubus L.*) y sauco negro (*Sambucus nigra*) (1,271 ± 58; 1,105 ± 90; 1,615 ± 113 y 1,271 ± 98 mg ET L⁻¹, respectivamente) (Czyżowska et al., 2020).

La capacidad Antioxidante medida con ABTS mostró un aumento progresivo hasta el día 14, seguido de un descenso no significativo en los últimos días del proceso fermentativo (Figura 9C). Este incremento podría explicarse por la liberación de compuestos fenólicos ligados a la pared celular, que se solubilizan durante la fermentación debido a la acción enzimática de las levaduras (Alencar et al., 2018; Bimpilas et al., 2015; Motta et al., 2025). A diferencia del método FRAP, el ensayo ABTS ofrece una detección más amplia de compuestos antioxidantes, al evaluar tanto la capacidad de donación de electrones como la neutralización de radicales libres, e incluye la actividad hidrofílica y lipofílica (Re et al., 1999). Adicionalmente, la diferencia entre ambos métodos puede atribuirse a la mayor sensibilidad del ensayo ABTS frente a compuestos no fenólicos con capacidad antioxidante, como el ácido ascórbico y ciertos péptidos derivados de la fermentación, contribuyendo al aumento de la capacidad antioxidante observada por ABTS, pero no necesariamente detectada por FRAP (Gliszczynska-Swiglo, 2006). Bebidas alcohólicas fermentadas a partir de frutos de *Prunus serotina* han mostrado valores de capacidad antioxidante por ABTS de 1,504.1 mg ET L⁻¹, resultado similar al obtenido en este estudio (Rios-Corripio y Guerrero-Beltrán, 2020). Estos valores también son comparables con los reportados en vinos tintos comerciales (1,734 ± 603 mg ET L⁻¹), aunque superiores a los observados en vinos blancos (167.7±117.6 mg ET L⁻¹) (Villano et al., 2004). Asimismo, este valor fue superior al reportado en vinos elaborados sin adición de agua a partir de jugo de arándano (*Vaccinium myrtillus*), frambuesa (*Rubus idaeus*), zarzamora (*Rubus L.*) y sauco negro (*Sambucus nigra*) (1,075 ±

85; 438 ± 18 ; 638 ± 40 y 468 ± 23 mg ET L⁻¹, respectivamente) (Czyżowska et al., 2020).

El método CUPRAC mostró valores superiores a los de FRAP y ABTS (Figura 9C). Esto posiblemente debido a que el método CUPRAC puede medir tanto antioxidantes hidrofílicos como lipofílicos, y es sensible a compuestos con grupos tiol (-SH) y polifenoles, además, es aditivo y sensible, lo que significa que la capacidad antioxidante de una mezcla es igual a la suma de sus componentes individuales, algo que no siempre ocurre en FRAP o ABTS (Apak et al., 2007; Munteanu y Apetrei, 2021). Aunque FRAP también es un método de transferencia de electrones, funciona a pH ácido y es menos reactivo con ciertos antioxidantes, especialmente tioles y algunos polifenoles, lo que puede subestimar la capacidad antioxidante total. Por otra parte, ABTS es un método mixto (transferencia de electrones e hidrógeno) y, aunque es más versátil que FRAP, puede mostrar desviaciones en mezclas complejas y su respuesta puede variar según la naturaleza química de los antioxidantes presentes. Diversos estudios muestran que los valores de capacidad antioxidante obtenidos por CUPRAC suelen ser significativamente más altos que los de FRAP Y ABTS para extractos vegetales, alimentos y mezclas complejas (Apak et al., 2007; Munteanu y Apetrei, 2021; Özyürek et al., 2008). Sin embargo, el comportamiento de la capacidad antioxidante de CUPRAC a través del tiempo se asemeja al obtenido por ABTS, con un aumento progresivo hasta el día 14, seguido de un descenso significativo en sus valores.

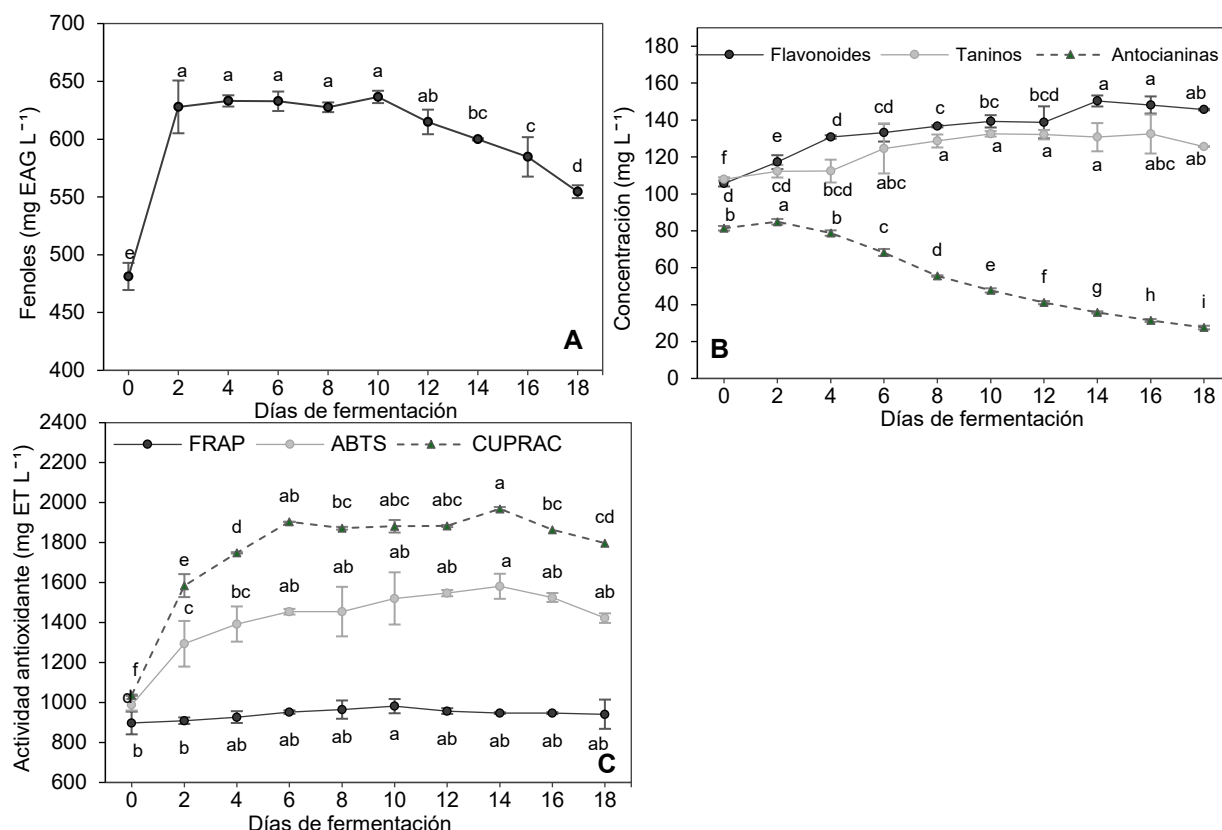


Figura 9. Cambios en los compuestos fenólicos y propiedades antioxidantes durante el proceso de fermentación alcohólica. A. Variación de compuestos fenólicos (mg EAG L⁻¹) B. Variación de los flavonoides (mg EC L⁻¹), taninos (mg EC L⁻¹) y antocianinas (mg EC3G L⁻¹) C. Cambios en la capacidad antioxidante por los métodos FRAP, ABTS y CUPRAC (mg ET L⁻¹). Los valores representan la media $\pm$ desviación estándar (n = 3). Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de fermentación (ANOVA, p < 0.05).

5.3.4 Cumplimiento normativo

La Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017 establece la denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba aplicables a bebidas alcohólicas en México. No obstante, esta regulación solo contempla bebidas fermentadas de manzana y pera (sidras) y de uva para la producción de vinos. Para otras bebidas fermentadas a partir de frutas no existe una normatividad específica; en consecuencia, los únicos parámetros aplicables son la concentración de etanol y los límites máximos de metanol, plomo y arsénico (Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017, Bebidas Alcohólicas-

Denominación, Especificaciones Fisicoquímicas, Información Comercial y Métodos de Prueba, 2017).

El contenido de etanol depende de la eficiencia fermentativa y de la actividad metabólica de las levaduras utilizadas, mientras que los niveles de metanol y metales pesados se relacionan principalmente con la composición de la materia prima (Czyżowska et al., 2020; Shen et al., 2024). Los frutos con mayor concentración de pectinas metoxiladas generan niveles más altos de metanol debido a la acción de la pectinmetilesterasa, que libera grupos metilo de la pectina, aumentando la concentración de metanol (Shen et al., 2024). Por lo tanto, el bajo contenido de metanol observado en la bebida (Cuadro 5) sugiere que *P. psychotrioides* posee una menor proporción de pectinas metoxiladas, lo cual constituye una ventaja en términos de seguridad alimentaria.

El cuadro 5 muestra los valores establecidos en la norma junto con los resultados de los análisis químicos de la bebida elaborada a partir de *P. psychotrioides*. Los datos obtenidos confirman que la bebida cumple con los límites normativos para productos fermentados en cuanto a concentración de etanol, metanol y metales pesados. Aunque la norma indica que no es obligatoria la determinación de aldehídos, alcoholes superiores y furfural en bebidas alcohólicas fermentadas, estos parámetros también fueron determinados en la bebida desarrollada a partir de frutos de *P. psychotrioides*, a partir del destilado obtenido para cuantificar el contenido alcohólico. Los valores obtenidos se encontraron dentro de los límites máximos permitidos, asegurando condiciones aptas para el consumo y producción de la bebida obtenida a partir de la fermentación de frutos de *P. psychotrioides*.

Cuadro 5. Especificaciones según la NOM-199-SCFI-2017 para bebidas alcohólicas

Especificaciones	Límite máximo	Bebida <i>P. psychotrioides</i>
Contenido de alcohol a 20 °C	2 a 20	11.65 ± 1.05
Metanol	300	< 11.55
Aldehídos	40	8.26 ± 2.7
Alcoholes superiores	500	235.85 ± 19.7
Furfural	5	< 2.02
Plomo (mg L ⁻¹)	0.5	0.2 ± 0.0
Arsénico (mg L ⁻¹)	0.5	0.2 ± 0.0

El valor del contenido de alcohol 20 °C se expresó en % Alc. Vol., los valores de metanol, aldehídos, alcoholes superiores y furfural en mg 100 mL⁻¹ de alcohol anhidro y el contenido de Pb y As en mg L⁻¹. Los valores de referencia para aldehídos, alcoholes superiores y furfural corresponden a las bebidas alcohólicas destiladas.

5.3.5 Aceptación sensorial

El grupo de panelistas estuvo conformado por 58 % hombres (n = 29) y 42 % mujeres (n = 21). Las edades de los participantes oscilaron entre los 18 y los 80 años, con una media de 44.2 años y una mediana de 42.5 años, lo que indica una dispersión moderada en la distribución etaria. La edad más frecuente fue 18 años, aunque representó solo una fracción minoritaria del total.

La prueba de aceptación global, evaluada mediante una escala hedónica de 5 puntos, mostró una media de 4.42 ± 0.58, lo que indica una alta aceptación del producto. La mediana y la moda coincidieron en un valor de 4. En cuanto a la distribución de los puntajes, el 50.0 % de los panelistas calificó con 4 puntos, el 46.2 % con 5 puntos y solo el 3.8 % con 3 puntos. Estos resultados evidencian que la mayoría de los evaluadores otorgó calificaciones favorables (≥ 4), reflejando una percepción positiva del producto por parte de los miembros de la comunidad.

5.4 Conclusiones

La fermentación alcohólica de *Parathesis psychotrioides* permitió obtener una bebida con contenido alcohólico de 11.65 ± 1.05 % v/v, aceptable sensorialmente y dentro de los límites establecidos por la NOM-199-SCFI-2017. El modelado cinético describió adecuadamente la degradación de azúcares y la producción de

etanol, evidenciando una conversión eficiente y buena tolerancia de las levaduras endógenas al etanol generado. Durante la fermentación se observó un alto contenido de compuestos fenólicos y se incrementaron los taninos y flavonoides, lo que mejoró la capacidad antioxidante (ensayos ABTS y CUPRAC), pese a la disminución de antocianinas. Estos resultados demuestran que el uso de levaduras endógenas bajo condiciones controladas permite obtener una bebida funcional y sensorialmente aceptable, mediante un proceso reproducible y económicamente viable. La valorización del capulín del monte mediante fermentación representa una estrategia sostenible para reducir pérdidas poscosecha, preservar su valor biocultural y generar productos regionales con potencial nutracéutico y comercial.

5.5 Literatura citada

- Ahmed, S. y Warne, T. y Stewart, A. y Byker Shanks, C. y Dupuis, V. (2022). Role of Wild Food Environments for Cultural Identity, Food Security, and Dietary Quality in a Rural American State. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.774701>
- Aiba, S. y Shoda, M. y Nagatani, M. (2000). Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*, 67(6), 671–690. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(20000320\)67:6<671::AID-BIT6>3.0.CO;2-W](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(20000320)67:6<671::AID-BIT6>3.0.CO;2-W)
- Alencar, N. M. M. y Cazarin, C. B. B. y Corrêa, L. C. y Maróstica Junior, M. R. y Biasoto, A. C. T. y Behrens, J. H. (2018). Influence of maceration time on phenolic compounds and antioxidant activity of the Syrah must and wine. *Journal of Food Biochemistry*, 42(2), e12471. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12471>
- Apak, R. y Güçlü, K. y Demirata, B. y Özyürek, M. y Çelik, S. E. y Bektaşoğlu, B. y Berker, K. I. y Özyurt, D. (2007). Comparative Evaluation of Various Total Antioxidant Capacity Assays Applied to Phenolic Compounds with the CUPRAC Assay. *Molecules*, 12(7), 1496–1547. <https://doi.org/10.3390/12071496>
- Basa, K. y Papanikolaou, S. y Dimopoulou, M. y Terpou, A. y Kallithraka, S. y Nychas, G. J. E. (2022). Trials of Commercial-and Wild-Type *Saccharomyces cerevisiae* Strains under Aerobic and Microaerophilic/Anaerobic Conditions: Ethanol Production and Must Fermentation from Grapes of Santorini (Greece) Native Varieties. *Fermentation*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/fermentation8060249>

- Benzie, I. y Cega, J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Berenguer, M. y Vegara, S. y Barrajón, E. y Saura, D. y Valero, M. y Martí, N. (2016). Physicochemical characterization of pomegranate wines fermented with three different *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains. *Food Chemistry*, 190, 848–855. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.06.027>
- Bezerra, M. y Cosme, F. y Nunes, F. M. (2024). Production and Characterization of Red Fruit Spirits Made from Red Raspberries, Blueberries, and Strawberries. *Foods*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/foods13081187>
- Bimpilas, A. y Tsimogiannis, D. y Balta-Brouma, K. y Lymperopoulou, T. y Oreopoulou, V. (2015). Evolution of phenolic compounds and metal content of wine during alcoholic fermentation and storage. *Food Chemistry*, 178, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.090>
- Cehula, M. y Baron, M. y Jurikova, T. y Alumbro, A. y Perrocha, M. y Ondrasek, I. y Mlcek, J. y Adamkova, A. y Sochor, J. (2020). THE STUDY OF SELECTED COMPONENTS OF GRAPE AND FRUIT WINES. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 759–766. <https://doi.org/10.5219/1390>
- Charansing, R. y Shrivastav, P. (2025). Comparative analysis of bioethanol production from agricultural wastes using *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus niger*, and their co-culture. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 9(1), 105–109. <https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i1b.3461>
- Chen, A. y Si, Q. y Xu, Q. y Pan, C. y Qu, T. y Chen, J. (2025). Evaluation of Stress Tolerance and Fermentation Performance in Commercial Yeast Strains for Industrial Applications. *Foods*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/foods14010142>
- Czyżowska, A. y Wilkowska, A. y Staszczak Mianowska, A. y Nowak, A. (2020). Characterization of phytochemicals in berry fruit wines analyzed by liquid chromatography coupled to photodiode-array detection and electrospray ionization/ion trap mass spectrometry (Lc-dad-esi-msn) and their antioxidant and antimicrobial activity. *Foods*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/foods9121783>
- Dou, Y. y Mei, M. y Kettunen, T. y Mäkinen, M. y Jänis, J. (2022). Chemical fingerprinting of phenolic compounds in Finnish berry wines using Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Food Chemistry*, 383. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132303>
- Drózdź, P. y Šežienė, V. y Pyrzynska, K. (2017). Phytochemical Properties and Antioxidant Activities of Extracts from Wild Blueberries and Lingonberries. *Plant Foods for Human Nutrition*, 72(4), 360–364. <https://doi.org/10.1007/s11130-017-0640-3>

- Dubois, M. y Gilles, K. A. y Hamilton, J. K. y Rebers, P. A. y Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Escudero-López, B. y Cerrillo, I. y Herrero-Martín, G. y Hornero-Méndez, D. y Gil-Izquierdo, A. y Medina, S. y Ferreres, F. y Berná, G. y Martín, F. y Fernández-Pachón, M. S. (2013). Fermented orange juice: Source of higher carotenoid and flavanone contents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(37), 8773–8782. <https://doi.org/10.1021/jf401240p>
- Felts, M. y Threlfall, R. y Worthington, M. (2019). Physicochemical and descriptive sensory analysis of arkansas-grown peaches and nectarines. *HortScience*, 54(2), 226–235. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13306-18>
- Ferreira, A. M. y Mendes-Faia, A. (2020). The role of yeasts and lactic acid bacteria on the metabolism of organic acids during winemaking. *Foods*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/foods9091231>
- Figueredo Oliveira Santos, V. A. y Rajan, M. y Narain, N. (2024). Bioactive Compounds, Volatiles Profile, and Antioxidant Property of Jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) Fruit Pulp-Based Fermented Beverages. *Journal of Culinary Science & Technology*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/15428052.2024.2438092>
- García, G. y Moreno, J. F. y Bernal, T. y Posso, F. y Delgado-Noboa, J. (2024). Kinetic Modeling of Mead Production. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 82(2), 170–178. <https://doi.org/10.1080/03610470.2023.2228190>
- Gliszczynska-Swiglo, A. (2006). Antioxidant activity of water soluble vitamins in the TEAC (trolox equivalent antioxidant capacity) and the FRAP (ferric reducing antioxidant power) assays. *Food Chemistry*, 96(1), 131–136. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2005.02.018>
- Hellström, J. y Karhu, S. y Karhu, J. y Järvenpää, E. y Välimaa, A. L. (2024). Phenolic profiles differentiate wild bilberry and cultivated blueberry fruit. *LWT*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116080>
- Jabeen, S. y Arshad, F. y Harun, N. y Waheed, M. y Alamri, S. y Haq, S. M. y Vitasović-Kosić, I. y Fatima, K. y Chaudhry, A. S. y Bussmann, R. W. (2024). Folk Knowledge and Perceptions about the Use of Wild Fruits and Vegetables—Cross-Cultural Knowledge in the Pipli Pahar Reserved Forest of Okara, Pakistan. *Plants*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/plants13060832>
- Jiang, H. y Liu, Z. y Cai, W. y Xiao, G. y Liu, J. y Zou, L. y Wang, Q. y Weng, L. y Jiang, H. y Qiu, J. y Fu, J. (2023). Analysis of sucrose addition on the physicochemical properties of blueberry wine in the main fermentation. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1092696>
- Kaur, S. y Kaur, K. y Bhushan, B. y Kaur, M. y Hans, M. (2020). Inoculum size and Age studies on single and Mixed Strain Fermentation of Grape Juice.

- Journal of Pure and Applied Microbiology*, 14(3), 2137–2145. <https://doi.org/10.22207/JPAM.14.3.54>
- Keş̇a, A. L. y Pop, C. R. y Mudura, E. y Salanță, L. C. y Pasqualone, A. y Dărab, C. y Burja-Udrea, C. y Zhao, H. y Coldea, T. E. (2021). Strategies to improve the potential functionality of fruit-based fermented beverages. *Plants*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/plants10112263>
- Kubola, J. y Siriamornpun, S. (2011). Phytochemicals and antioxidant activity of different fruit fractions (peel, pulp, aril and seed) of Thai gac (*Momordica cochinchinensis* Spreng). *Food Chemistry*, 127(3), 1138–1145. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.115>
- Lee, J. y Durst, R. y Wrolstad, R. y Eisele, T. y Giusti, M. y Hach, J. y Hofsommer, H. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC international*, 88(5), 1269–1278. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.5.1269>
- Li, E. y Mira de Orduña, R. (2020). Acetaldehyde metabolism in industrial strains of *Saccharomyces cerevisiae* inhibited by SO₂ and cooling during alcoholic fermentation. *OENO One*, 54(2), 351–358. <https://doi.org/10.20870/oenone.2020.54.2.2391>
- Ma, Y. y Hou, C. J. y Li, D. y Huo, D. Q. (2018). The effect and evidence of ethanol content on the stability of anthocyanins from purple-fleshed sweet potato. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13484>
- Mahapatra, A. K. y Panda, P. C. (2012). Wild edible fruit diversity and its significance in the livelihood of indigenous tribals: Evidence from eastern India. *Food Security*, 4(2), 219–234. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0186-z>
- Merve, N. y Uzkuç, Ç. y Bayhan, · Asli y Ayşegül, · y Toklucu, K. (2022). *Phenolics and color components of young Cabernet Sauvignon wines: effect of spontaneous fermentation and bottle storage*. 248, 393–401. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03884-x>
- Miller, G. L. (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical chemistry*, 31(3), 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Mothupi, F. M. y Shackleton, C. M. (2025). Traditional knowledge and consumption of wild edible plants in rural households, Limpopo Province, South Africa. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 21(1). <https://doi.org/10.1186/s13002-025-00773-5>
- Motta, S. y Cassino, C. y Bosso, A. y Lopresti, M. y Messina, S. y Calegari, G. y Basana, A. y Ravera, M. (2025). Characterization of 37 enological tannins using a multiple technique approach: Linear sweep voltammetry as a rapid

- method both for classification and determination of antioxidant properties. *Food Chemistry*, 463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141475>
- Munteanu, I. G. y Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7). <https://doi.org/10.3390/ijms22073380>
- Mutelo, C. y Nyau, V. y Choobe, B. y Marinda, P. y Hachibamba, T. (2022). Indigenous Knowledge on Utilization Aspects of Selected Edible Wild Fruits from Zambia. *Journal of Food Research*, 12(1), 48. <https://doi.org/10.5539/jfr.v12n1p48>
- Neme, A. K. y Murgo, M. y Cobos, D. (2014). Use of the evapo-distillation of reverse flow to obtain new products derived from grape. *BIO Web of Conferences*, 3, 02010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20140302010>
- NMX-V-050-NORMEX-2010. Bebidas alcohólicas – determinación de metales como cobre (Cu), plomo (Pb), arsénico (As), zinc (Zn), hierro (Fe), calcio (Ca), mercurio (Hg), cadmio (Cd), por absorción atómica – método de ensayo, Diario Oficial de la Federación (2011).
- NMX-V-005-NORMEX-2018. Bebidas alcohólicas. - determinación de aldehídos, ésteres, metanol y alcoholes superiores – métodos de ensayo, Diario Oficial de la Federación (2019).
- NMX-V-004-NORMEX-2018. Bebidas alcohólicas – determinación de furfural- métodos de ensayo, Diario Oficial de la Federación (2020).
- NMX-V-013-NORMEX-2019. Bebidas alcohólicas-determinación del contenido alcohólico (por ciento de alcohol en volumen a 20 °C) (% alc. vol.) - métodos de ensayo, Diario Oficial de la Federación (2020).
- Özyürek, M. y Bektaşoğlu, B. y Güçlü, K. y Güngör, N. y Apak, R. (2008). Simultaneous total antioxidant capacity assay of lipophilic and hydrophilic antioxidants in the same acetone-water solution containing 2% methyl- β -cyclodextrin using the cupric reducing antioxidant capacity (CUPRAC) method. *Analytica Chimica Acta*, 630(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.09.057>
- Paventi, G. y Di Martino, C. y Coppola, F. y Iorizzo, M. (2025). β -Glucosidase Activity of *Lactiplantibacillus plantarum*: A Key Player in Food Fermentation and Human Health. En *Foods* (Vol. 14, Número 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/foods14091451>
- Payan, C. y Gancel, A. L. y Jourdes, M. y Christmann, M. y Teissedre, P. L. (2023). Wine acidification methods: a review. *Oeno One*, 57(3), 113–126. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.3.7476>
- Phukoetphim, N. y Salakkam, A. y Laopaiboon, P. y Laopaiboon, L. (2017a). Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: Logistic and modified Gompertz models. *Journal of Biotechnology*, 243, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.12.012>

- Phukoetphim, N. y Salakkam, A. y Laopaiboon, P. y Laopaiboon, L. (2017b). Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: Logistic and modified Gompertz models. *Journal of Biotechnology*, 243, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.12.012>
- Re, R. y Pellegrini, N. y Proteggente, A. y Pannala, A. y Yang, M. y Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26(9), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rios-Corripio, G. y Guerrero-Beltrán, J. (2020). Physicochemical, Antioxidant and Sensory Characteristics of Black Cherry (*Prunus Serotina* Subsp. *Capuli*) Fermented Juice. *International Journal of Fruit Science*, 20(S2), S145–S163. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1709113>
- Ruiz-Rodríguez, A. y Palma, M. y Barroso, C. G. (2021). Influence of temperature during pre-fermentative maceration and alcoholic fermentation on the phenolic composition of ‘cabernet sauvignon’ wines. *Foods*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/foods10051053>
- Saito, H. y Posas, F. (2012). Response to hyperosmotic stress. *Genetics*, 192(2), 289–318. <https://doi.org/10.1534/genetics.112.140863>
- Santana, S. A. y Batista, S. A. y da Costa Maynard, D. y Ginani, V. C. y Zandonadi, R. P. y Botelho, R. B. A. (2023). Acceptability of School Menus: A Systematic Review of Assessment Methods. En *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 20, Número 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032242>
- Sayyad, S. F. y Chaudhari, S. R. y Panda, B. P. (2015). Quantitative determination of ethanol in arishta by using UV-visible spectrophotometer. *Pharmaceutical and Biological Evaluations*, 2(5), 204–207. www.onlinepbe.com
- Norma Oficial Mexicana NOM-199-SCFI-2017, Bebidas alcohólicas-Denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba, Diario Oficial de la Federación (2017).
- Shen, J. y Huang, W. y You, Y. y Zhan, J. (2024). Controlling strategies of methanol generation in fermented fruit wine: Pathways, advances, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(6), e70048. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70048>
- Singleton, V. y Rossi, J. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Sosa, A. V. y Povilonis, I. S. y Borroni, V. y Pérez, E. y Radice, S. y Arena, M. E. (2025). Unveiling the Potential of Southern Elderberry (*Sambucus australis*): Characterization of Physicochemical Properties, Carbohydrates,

- Organic Acids and Biophenols. *Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands)*, 80(1), 45. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01288-2>
- Srinivas, S. y Tiku, P. K. (2014). Reaction Kinetics of the Invertase from Yeast (*S. Cerevisiae*). *Food Biophysics*, 9(2), 179–183. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9330-y>
- Tran Duc Duy y Nguyen Tran Bao Chau. (2024). Study on the production of strong alcoholic beverage from jackfruit flesh and seeds (*Artocarpus Heterophyllus*). *TRA VINH UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE*. <https://doi.org/10.35382/tvujs.14.3.2024.8>
- Tronchoni, J. y Gamero, A. y Arroyo-López, F. N. y Barrio, E. y Querol, A. (2009). Differences in the glucose and fructose consumption profiles in diverse *Saccharomyces* wine species and their hybrids during grape juice fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 134(3), 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.07.004>
- Tsegay, Z. T. y Sathyanarayana, C. B. y Lemma, S. M. (2018). Optimization of cactus pear fruit fermentation process for wine production. *Foods*, 7(8). <https://doi.org/10.3390/foods7080121>
- Villaño, D. y Fernández-Pachón, M. S. y Troncoso, A. M. y García-Parrilla, M. C. (2004). The antioxidant activity of wines determined by the ABTS[•] + method: Influence of sample dilution and time. *Talanta*, 64(2), 501–509. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.03.021>
- Vion, C. y Yeramian, N. y Hranilovic, A. y Masneuf-Pomarède, I. y Marullo, P. (2024). Influence of yeasts on wine acidity: new insights into *Saccharomyces cerevisiae*. *OENO One*, 58(4). <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2024.58.4.7877>
- Wallace, T. C. y Giusti, M. M. (2010). Evaluation of Parameters that Affect the 4-Dimethylaminocinnamaldehyde Assay for Flavanols and Proanthocyanidins. *Journal of Food Science*, 75(7), C619–C625. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01734.x>
- Wang, Z. y Svyantek, A. y Miller, Z. y Watrelot, A. A. y Kapus, A. (2025). Juice Dilution Affects Haskap (*Lonicera caerulea* L.) Wine Fermentation Completion and Wine Chemistry. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2025(1), 5257507. <https://doi.org/10.1155/jfpp/5257507>
- Wu, Y. y Li, S. y Tao, Y. y Li, D. y Han, Y. y Show, P. L. y Wen, G. y Zhou, J. (2021). Fermentation of blueberry and blackberry juices using *Lactobacillus plantarum*, *Streptococcus thermophilus* and *Bifidobacterium bifidum*: Growth of probiotics, metabolism of phenolics, antioxidant capacity in vitro and sensory evaluation. *Food Chemistry*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129083>
- Zhang, P. y Ma, W. y Meng, Y. y Zhang, Y. y Jin, G. y Fang, Z. (2021). Wine phenolic profile altered by yeast: Mechanisms and influences. *En*

Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety (Vol. 20, Número 4, pp. 3579–3619). Blackwell Publishing Inc.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12788>

Zou, B. y Wu, J. y Yu, Y. y Xiao, G. y Xu, Y. (2017). Evolution of the antioxidant capacity and phenolic contents of persimmon during fermentation. *Food Science and Biotechnology*, 26(3), 563–571.
<https://doi.org/10.1007/s10068-017-0099-x>

6 CONCLUSIONES GENERALES

La presente investigación permitió generar conocimiento sobre la fisiología, composición química, potencial nutracéutico y valorización biotecnológica del fruto de *Parathesis psychotrioides*. Los resultados obtenidos evidencian que este recurso subutilizado posee un perfil fisicoquímico, mineral y funcional superior al de otros frutos reconocidos por su alto contenido de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, lo que refuerza su potencial como alimento funcional y como materia prima para el desarrollo de productos con valor agregado.

La caracterización fisiológica reveló que la maduración del fruto involucra cambios morfológicos, físicos y químicos bien definidos, destacando el incremento continuo en dimensiones, la pérdida progresiva de firmeza y la transición cromática de verde a púrpura como indicadores confiables del estado de madurez. El aumento sostenido de sólidos solubles totales, la predominancia de azúcares reductores y el incremento de la acidez titulable configuran un perfil sensorial equilibrado entre dulzura y acidez. También se evidencio que la composición y concentración de compuestos fenólicos varían según el estadio de maduración, y que los métodos empleados para evaluar la capacidad antioxidante son complementarios: el ensayo FRAP resultó más representativo en fases tempranas, mientras que el ABTS fue más sensible a los pigmentos fenólicos de los estadios avanzados. No obstante, la elevada tasa respiratoria registrada en todos los estadios constituye el principal factor limitante para la conservación poscosecha y la comercialización.

El análisis fitoquímico evidenció que los frutos maduros poseen concentraciones excepcionales de compuestos fenólicos, incluyendo flavonoides, antocianinas y taninos condensados, asociados a una notable capacidad antioxidante. Asimismo, los frutos de *P. psychotrioides* destacaron por elevado contenido de

carbohidratos, proteína, fibra dietética y minerales esenciales como potasio, fósforo, magnesio, hierro y zinc, lo que sustenta su clasificación como alimento funcional con potencial para mejorar la calidad nutricional de comunidades rurales e indígenas.

La fermentación alcohólica espontánea demostró ser una estrategia tecnológica viable para la valorización de los frutos de *P. psychotrioides*, obteniendo una bebida con un contenido alcohólico comparable al de vinos comerciales, elevado contenido de compuestos bioactivos, alta capacidad antioxidante y buena aceptación sensorial, cumpliendo con la normatividad vigente. Este proceso, además de mitigar pérdidas poscosecha, representa una alternativa sostenible, replicable y de bajo costo para el desarrollo de productos regionales con valor agregado.