



TACLLA

revistas.unf.edu.pe/taclla
doi.org/10.57063/rcitac.v1i1.184



FONDO EDITORIAL UNF

ARTÍCULO ORIGINAL



Aplicación de pretratamiento ultrasónico en el secado convectivo del mango ciruelo (*Spondias dulcis*): Efectos sobre la cinética de deshidratación y retención de compuestos bioactivos

Application of ultrasonic pretreatment in convective drying of mango plum (*Spondias dulcis*): Effects on dehydration kinetics and retention of bioactive compounds

Jared Alvarado-Abad ¹ ; Luis Alberto Ruiz-Flores ^{1*} ; Karina Silvana Gutiérrez-Valverde ¹ ; Luis Alfredo Espinoza-Espinoza ²

¹ Grupo de Investigación de Alimentos Funcionales y Bioingeniería, Universidad Nacional de Frontera, Sullana, 20100, Perú

² Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Barranca, Barranca, 15169, Perú.

*Autor de correspondencia: Luis Alberto Ruiz-Flores - lruizf@unf.edu.pe

Received: 20 October 2025. Accepted: 15 December 2025. Published: 17 December 2025.

Abstract

Healthy eating is essential for students to maintain a balanced lifestyle and prevent diseases. It involves consuming a variety of foods that provide nutrients and proteins, for better academic performance, the present research aimed to carry out effective interventions to promote healthy eating habits in students of the I.E.E José María Arguedas Altamirano of the district of Acraquia, Tayacaja province of the department of Huancavelica.

The present research was descriptive, qualitative, documentary analysis and non-experimental design since we only collected data, likewise, strategic tools were applied such as: SWOT, Smart and an improvement plan, resulting in the students of the José María Arguedas Altamirano de Acraquia. Tayacaja-Huancavelica, have improved their healthy eating habits and ensured better academic performance, optimal health and well-being. Therefore, we conducted the approach of strategies, which helped to improve nutrition and academic performance, to implement our goal we used the SWOT tool, SMART methodology and the Improvement Plan, these made it simpler and more practical compliance in improving school diet.

Keywords: Ultrasound, Convective drying, *Spondias dulcis*, Bioactive compounds, Vitamin C, Phenolic, Compounds, Drying kinetics.

Resumen

El mango ciruelo (*Spondias dulcis*) es una fruta tropical rica en compuestos bioactivos pero subutilizada por su alta perecibilidad. Aunque el secado convectivo permite su conservación, los métodos tradicionales requieren tiempos prolongados que pueden degradar compuestos termosensibles. El pretratamiento ultrasónico surge como tecnología prometedora para acelerar la deshidratación preservando fitoquímicos. El objetivo fue evaluar el efecto del pretratamiento ultrasónico sobre la cinética de secado convectivo y la retención de compuestos bioactivos en harina de *Spondias dulcis*. Se procesaron frutos mediante pretratamiento ultrasónico (37 kHz, 20 y 40 minutos) seguido de secado convectivo a 50, 65 y 80°C. Se evaluó la cinética de deshidratación, vitamina C por espectrofotometría con 2,6-dicloroindofenol, y compuestos fenólicos totales por Folin-Ciocalteu. Se empleó diseño factorial 3x2 con ANOVA ($\alpha=0.05$). El pretratamiento ultrasónico redujo significativamente el tiempo de secado hasta 96% (107 vs 1253 minutos a 80°C). Sin embargo, causó pérdidas sustanciales de compuestos bioactivos, especialmente con exposiciones de 40 minutos. Las menores retenciones fueron 25.30-32.34 mg/100g para vitamina C y 142.44-154.67 mg GAE/100g para fenoles totales. El tratamiento óptimo (20 minutos ultrasonido, 65°C secado) mantuvo 90.05 mg/100g de vitamina C y 297.63 mg GAE/100g de fenoles totales. El pretratamiento ultrasónico acelera efectivamente el secado con ahorro energético considerable, pero compromete la retención de bioactivos. Investigaciones futuras deberían explorar frecuencias alternativas, tiempos de exposición más cortos y caracterización microestructural para optimizar el equilibrio entre eficiencia energética y preservación nutricional.

Keywords: ultrasonido, secado convectivo, *Spondias dulcis*, compuestos bioactivos, vitamina C, compuestos fenólicos, cinética de secado.

Cite this article:

Alvarado, C.; Jared et al. (2025). Aplicación de pretratamiento ultrasónico en el secado convectivo del mango ciruelo (*Spondias dulcis*): Efectos sobre la cinética de deshidratación y retención de compuestos bioactivos. *Revista Científica de Ingeniería de la Universidad Nacional de Frontera: Taclla*, 1(1), 16-26. doi.org/10.57063/rcitac.v1i1.184

1. INTRODUCCIÓN

Las frutas tropicales representan una fuente importante de compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y beneficios para la salud humana, sin embargo, muchas especies permanecen subutilizadas debido a su corta vida útil y estacionalidad (Kalt, 2005). El mango ciruelo (*Spondias dulcis* Parkinson), también conocido como ambarella o manzana dorada, es una fruta tropical climatérica nativa de Polinesia que se caracteriza por su alto contenido de humedad (87.2-90.0%) y rápida perecibilidad postcosecha (Favier et al., 1993; Graham et al., 2004).

Esta especie presenta un considerable valor nutricional, con contenidos significativos de vitamina C (5.86-35.0 mg/100 g) y compuestos fenólicos (338 mg/100 g), que le confieren propiedades antioxidantes relevantes para la prevención de enfermedades degenerativas (Ishak et al., 2005). A pesar de su potencial nutricional y funcional, *S. dulcis* ha recibido limitada atención científica y comercial, siendo considerada una fruta infrautilizada que merece mayor investigación para su aprovechamiento industrial (Morton, 1987; Ee et al., 2019).

El procesamiento mediante deshidratación representa una estrategia viable para prolongar la vida útil de frutas perecederas y concentrar sus compuestos bioactivos (Zhang et al., 2017). El secado por convección con aire caliente es una de las técnicas más empleadas para la conservación de alimentos debido a su efectividad y economía. Sin embargo, los métodos convencionales de secado frecuentemente requieren tiempos prolongados y temperaturas elevadas, lo que puede resultar en la degradación de compuestos termosensibles como la vitamina C y polifenoles, afectando la calidad nutricional y funcional del producto final (Cohen & Yang, 1995; Miranda et al., 2009).

En este contexto, el desarrollo de tecnologías emergentes que mejoren la eficiencia del secado mientras preserve la calidad de los alimentos ha cobrado relevancia. La aplicación de ultrasonido como pretratamiento antes del secado convencional ha demostrado ser una tecnología prometedora que puede acelerar la transferencia de masa, reducir el tiempo de procesamiento y mejorar la retención de compuestos fitoquímicos (Mothibe et al., 2011; Baeghbal et al., 2019). El mecanismo de acción del ultrasonido se basa en el fenómeno de cavitación acústica, que genera compresiones y expansiones alternadas en el tejido vegetal, creando canales microscópicos que facilitan la eliminación de humedad intracelular mediante el denominado "efecto esponja" (Soria & Villamiel, 2010).

Investigaciones previas han reportado efectos positivos del pretratamiento ultrasónico en la cinética de secado de diversas matrices alimentarias. Nowacka et al. (2012) demostraron que el tratamiento con ultrasonido a 35 kHz durante 30 minutos redujo el tiempo de secado de manzana en 31-40% comparado con muestras no tratadas. Similarmente, Izli y Yildiz (2021) observaron que el pretratamiento ultrasónico mejoró la retención de vitamina C en membrillo secado por convección, mientras que Önal et al. (2021) reportaron mayor conservación de compuestos fenólicos en pera tratada con ultrasonido.

No obstante, los efectos del ultrasonido sobre la retención de compuestos bioactivos pueden variar según las condiciones operacionales empleadas. Algunos estudios sugieren que tiempos prolongados de sonicación pueden ocasionar pérdidas de fitoquímicos debido a la ruptura celular excesiva (Stojanovic & Silva, 2007). Por tanto, la optimización de parámetros como frecuencia, tiempo de exposición y temperatura de secado resulta fundamental para maximizar los beneficios del proceso.

Hasta la fecha, no existen estudios que evalúen sistemáticamente el efecto del pretratamiento ultrasónico sobre la cinética de secado y retención de compuestos bioactivos en *Spondias dulcis*. Esta investigación representa el primer acercamiento científico integral para caracterizar el comportamiento de esta especie durante el procesamiento por deshidratación asistida por ultrasonido.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del pretratamiento ultrasónico (37 kHz, 20 y 40 minutos de exposición) sobre la cinética de secado convectivo a diferentes temperaturas (50, 65 y 80°C) y su efecto en la retención de ácido ascórbico y compuestos fenólicos totales en harina de *Spondias dulcis*. Los resultados de esta investigación contribuirán al desarrollo de tecnologías de procesamiento que permitan la valorización de esta fruta subutilizada, optimizando tanto la eficiencia energética del proceso como la preservación de su valor nutricional y funcional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materia prima y reactivos:

Se utilizaron 10 kg de frutos de mango ciruelo (*Spondias dulcis* Parkinson) en estado de madurez fisiológica verde, recolectados en el distrito de Marcavelica, provincia de Sullana, departamento de Piura, Perú (5°10'S, 80°40'O). Los frutos fueron seleccionados manualmente descartando aquellos con daños físicos o fitopatológicos visibles. Las características fisicoquímicas iniciales de la materia prima fueron: humedad 87.26%, pH 2.82, sólidos solubles 8.5°Brix y acidez titulable 0.038%.

Los reactivos empleados para los análisis fitoquímicos incluyeron: 2,6-dicloroindofenol sal sódica, ácido oxálico al 0.4%, patrón de ácido ascórbico (C₆H₈O₆), reactivo de Folin-Ciocalteu, metanol (CH₃OH) y carbonato de sodio (Na₂CO₃), todos de grado analítico.

2.2. Equipos

El procesamiento y análisis se realizó empleando: equipo de ultrasonido Elmasonic P 30 H (capacidad 3 L),

deshidratador convectivo Maqorito ST-01 (10 bandejas), espectrofotómetro UV-visible Thermoscientific Genesys 150, molinillo pulverizador RAF multifuncional (300 W), centrífuga Hettich Rotofix 32A, balanza analítica A&D HR-250AZ (precisión ± 0.1 mg), balanza de humedad A&D MX-50, anemómetro digital para medición de velocidad de aire, y agitador vórtex.

2.3. Preparación de muestras

Los frutos fueron lavados y desinfectados por inmersión en solución de hipoclorito de sodio (50 ppm, 20 min), posteriormente pelados manualmente y cortados en rodajas de 2 mm de espesor utilizando un cortador calibrado. Las semillas fueron removidas completamente. Las muestras preparadas se almacenaron bajo refrigeración (13°C) hasta su procesamiento.

2.4. Pretratamiento ultrasónico

Las rodajas de mango ciruelo fueron sometidas a pretratamiento ultrasónico utilizando un equipo Elmasonic P 30 H operando a 37 kHz de frecuencia. Se empleó una relación agua destilada:fruta de 1:6 (p/v), sumergiendo 200 g de material vegetal en 1 L de agua destilada. Los tiempos de exposición evaluados fueron 20 y 40 minutos. Posterior al tratamiento, las muestras fueron escurridas y secadas superficialmente con papel absorbente para remover el exceso de agua. Se incluyeron muestras control sin pretratamiento ultrasónico.

2.5. Proceso de secado

El secado se realizó en un deshidratador convectivo a temperaturas de 50, 65 y 80°C, con velocidad de aire constante de 2.4 m/s y humedad relativa del 37%. Las muestras fueron distribuidas uniformemente en bandejas de acero inoxidable y el proceso se monitoreó mediante pesaje cada 20 minutos hasta alcanzar una humedad final inferior al 10% (base seca), según especificaciones técnicas del Programa Qali Warma (2022).

2.6 Obtención de harina

Las muestras secas fueron molidas en un pulverizador RAF (300 W) mediante intervalos de 20 segundos hasta completar 5 ciclos (tiempo total: 1.4 min). Posteriormente se tamizaron utilizando malla N° 70 (210 μ m) para obtener un polvo homogéneo. La harina resultante fue envasada en bolsas de polietileno herméticas y almacenada en condiciones ambientales controladas hasta su análisis.

2.7 Determinación de compuestos fenólicos totales

El contenido de fenoles totales se determinó mediante el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu según Ruiz (2022) con modificaciones. Para la extracción, se pesó 1 g de harina y se añadieron 4 mL de metanol más 1 mL de agua destilada. La mezcla se homogeneizó en vórtex (2500 rpm, 20 min) y se centrifugó (4500 rpm, 20 min). Se realizó una segunda extracción del precipitado y ambos sobrenadantes se combinaron.

Para la cuantificación, se mezclaron 300 μ L de extracto metanólico con 1.364 mL de agua destilada y 136 μ L de reactivo Folin-Ciocalteu. Después de 8 minutos en reposo, se añadieron 1.2 mL de carbonato de sodio al 7.5% y la mezcla se incubó 2 horas en oscuridad a temperatura ambiente. La absorbancia se midió a 760 nm utilizando espectrofotómetro UV-visible. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (GAE)/100 g de muestra, empleando una curva de calibración con ácido gálico como estándar.

2.8. Determinación de vitamina C

El contenido de ácido ascórbico se determinó según el método de Ruiz (2022) modificado. Se empleó ácido oxálico al 0.4% como solvente de extracción en relación 1:10 (p/v). Un gramo de harina se homogeneizó con 5 mL de ácido oxálico, se agitó en vórtex (2500 rpm, 5 min) y se centrifugó (4000 rpm, 20 min). Se realizó doble extracción y los sobrenadantes se combinaron.

La cuantificación se realizó por espectrofotometría a 520 nm utilizando 2,6- dicloroindofenol al 0.012% como reactivo colorimétrico. Se prepararon dos lecturas: L1 con 200 μ L de ácido oxálico y 1800 μ L de dicloroindofenol, y L2 con 200 μ L de extracto muestra y 1800 μ L de dicloroindofenol. El contenido de vitamina C se calculó mediante la diferencia (L1-L2) utilizando una curva de calibración con ácido ascórbico estándar. Los resultados se expresaron como mg de ácido ascórbico/100 g de muestra.

2.9. Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño factorial 3 \times 2 evaluando temperatura de secado (50, 65, 80°C) y tiempo de pretratamiento ultrasónico (20, 40 min), más controles sin tratamiento ultrasónico. Todos los tratamientos se realizaron por triplicado (n=3).

Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos ($\alpha=0.05$). La normalidad de los datos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Para las comparaciones múltiples se aplicó la prueba de Tukey. El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab versión 19. El modelo estadístico empleado fue:

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde: y_{ijk} = variable respuesta, μ = media general, A_i = efecto de temperatura, B_j = efecto de tiempo de ultrasonido, $(AB)_{ij}$ = efecto de interacción, ϵ_{ijk} = error experimental.

3. RESULTADOS

3.1 Características fitoquímicas de la materia prima

El análisis de la pulpa fresca de *Spondias dulcis* en estado fisiológicamente verde reveló un contenido de compuestos fenólicos totales de 67.9 ± 0.61 mg GAE/100 g y vitamina C de 15.9 ± 0.62 mg de ácido ascórbico/100 g (Tabla 1). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para esta especie, confirmando su potencial como fuente de compuestos bioactivos.

Tabla 1

Contenido fitoquímico (mg/100 g de pulpa)

Análisis	Unidad	Cantidad
Fenoles totales	mg ác. gálico/100 g	67.9 ± 0.61
Vitamina C	mg ác. ascórbico/100 g	15.9 ± 0.62

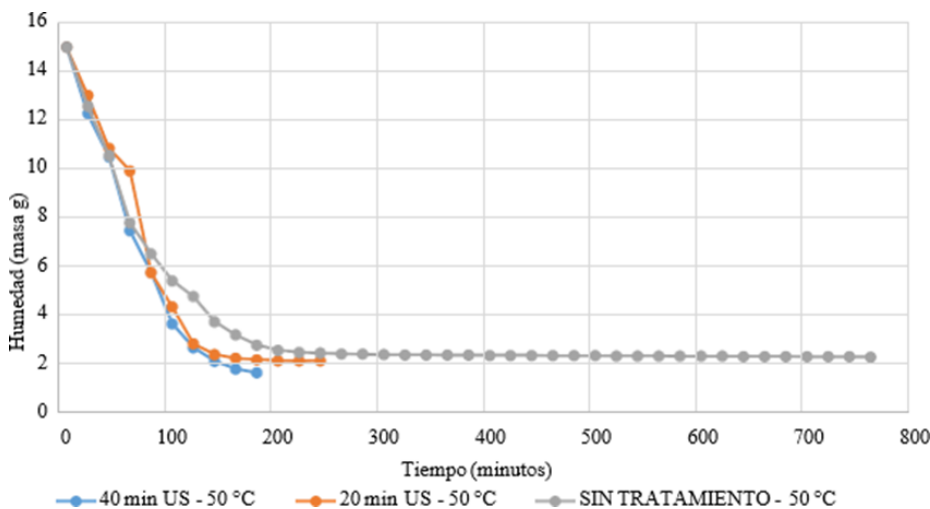
Nota. Valores medios \pm desviación estándar del contenido de compuestos fenólicos y vitamina C en la muestra fresca de mango ciruelo

3.2 Efecto del pretratamiento ultrasónico sobre la cinética de secado

El pretratamiento ultrasónico demostró un efecto significativo en la aceleración del proceso de deshidratación. Las curvas de secado presentadas en las Figuras 1, 2 y 3 muestran que el tiempo de exposición al ultrasonido influyó positivamente en la velocidad de eliminación de humedad. A 50°C, el tratamiento con ultrasonido durante 40 minutos redujo el tiempo de secado a 187 minutos, representando una reducción del 96% comparado con las muestras control (4233 minutos). Similarmente, el tratamiento de 20 minutos logró un tiempo de secado de 253 minutos, equivalente a una reducción del 94% (Figura 1).

Figura 1

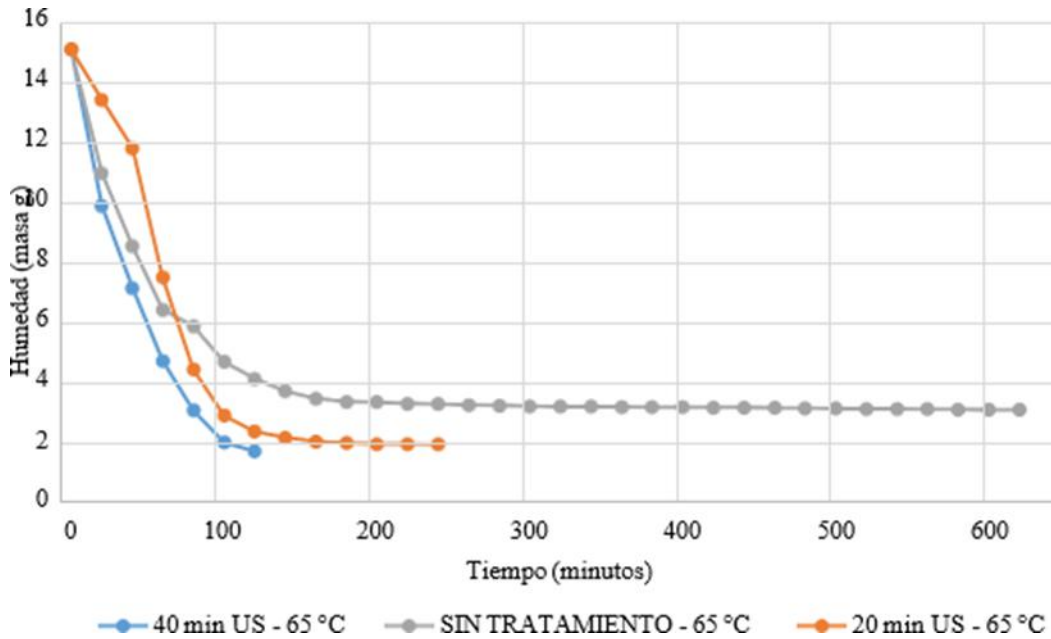
Cinética de secado de rodajas de *Spondias dulcis* a 50°C con y sin pretratamiento ultrasónico



Nota. Curvas de pérdida de humedad en función del tiempo para muestras tratadas con ultrasonido (20 y 40 min) y control sin tratamiento a temperatura de secado de 50°C.

Figura 2

Cinética de secado de rodajas de Spondias dulcis a 65°C con y sin pretratamiento ultrasónico



Nota. Evolución temporal de la pérdida de humedad en muestras pretratadas ultrasónicamente (20 y 40 min) comparado con control a 65°C de secado.

A temperaturas de secado más elevadas, la eficiencia del pretratamiento ultrasónico se incrementó notablemente. A 65°C, los tratamientos de 40 y 20 minutos de ultrasonido resultaron en tiempos de secado de 133 y 247 minutos respectivamente, comparado con 1287 minutos para las muestras control (Figura 2). El mayor efecto sinérgico se observó a 80°C, donde el pretratamiento de 40 minutos redujo el tiempo de secado a 107 minutos (reducción del 93%), mientras que el tratamiento de 20 minutos alcanzó 167 minutos (reducción del 88%) frente a 1253 minutos del control (Figura 3).

El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre todos los tratamientos evaluados (Tabla 2). El diagrama de Pareto (Figura 4) identificó al tiempo de exposición al ultrasonido como el factor de mayor efecto estandarizado sobre la reducción del tiempo de secado, seguido por la temperatura de secado y su interacción.

Tabla 2

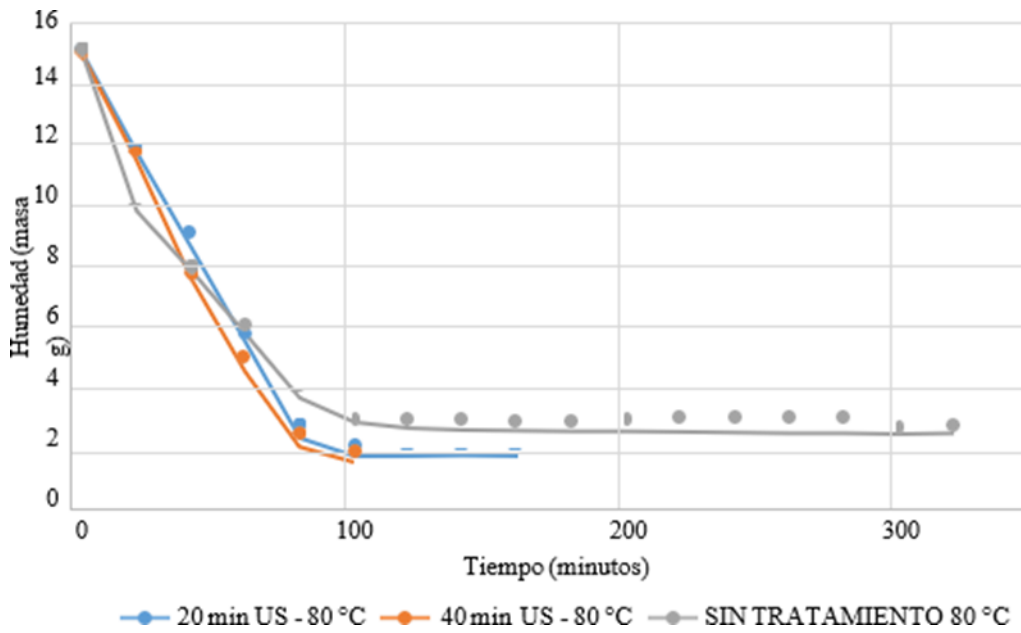
Cantidad de tiempo de secado sobre los tratamientos

Tratamiento	Temperatura de secado °C	Tiempo de ultrasonido	Tiempo de secado
1	50	20	253 ± 12d
2	50	40	187 ± 12e
3	65	20	247 ± 12d
4	65	40	133 ± 12g
5	80	20	167 ± 12f
6	80	40	107 ± 12h
Sin tratamiento por ultrasonido			
C1	50	-	4233 ± 12a
C2	65	-	1287 ± 12b
C3	80	-	1253.00 ± 23c

Nota: Medias ± desviación estándar para la prueba de Tukey. Las letras iguales indican grupos homogéneos. La exposición al ultrasonido durante 40 minutos mostró la menor cantidad de compuestos fenólicos totales.

Figura 14

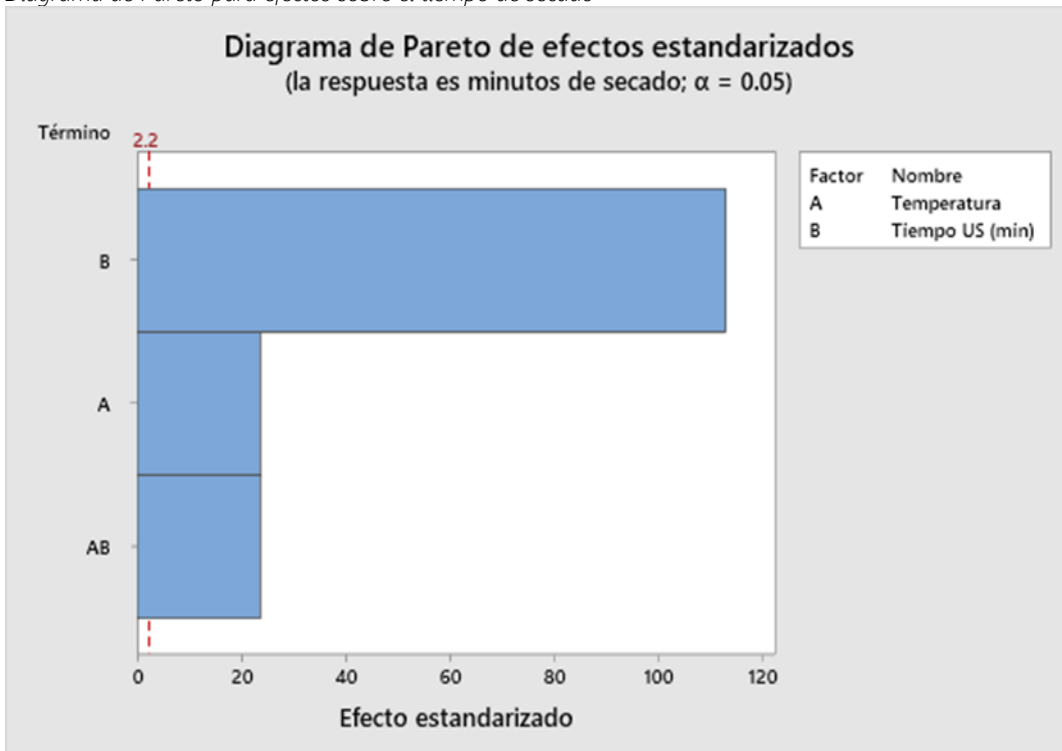
Cinética de secado de rodajas de *Spondias dulcis* a 80°C con y sin pretratamiento ultrasónico



Nota. Comportamiento de deshidratación de muestras con pretratamiento ultrasónico versus control a temperatura de secado de 80°C.

Figura 15

Diagrama de Pareto para efectos sobre el tiempo de secado



Nota. En la figura se muestra el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados correspondientes a la temperatura de secado (A), el tiempo de exposición al ultrasonido (B) y su interacción (A*B). Los resultados evidencian que el tiempo de exposición al ultrasonido constituye el factor con mayor influencia significativa sobre la duración del secado.

3.3 Retención de vitamina C

La aplicación del pretratamiento ultrasónico tuvo un efecto adverso sobre la retención de ácido ascórbico en todos los tratamientos evaluados. Los resultados presentados en la Tabla 3 muestran que las muestras sometidas a 40 minutos de ultrasonido presentaron las menores retenciones de vitamina C: 25.30 ± 3.79 mg/100 g a 50°C, 27.54 ± 3.68 mg/100 g a 65°C,

y 32.34 ± 5.87 mg/100 g a 80°C.

En contraste, los tratamientos con 20 minutos de exposición mostraron retenciones significativamente mayores ($p < 0.05$), siendo el tratamiento a 65°C el más efectivo (90.05 ± 7.10 mg/100 g), seguido por 80°C (87.70 ± 7.40 mg/100 g) y 50°C (41.94 ± 3.71 mg/100 g). Las muestras control sin pretratamiento ultrasónico exhibieron las mayores retenciones de vitamina C, particularmente a 50°C (164.02 ± 6.11 mg/100 g) y 65°C (158.0 ± 26.3 mg/100 g).

Tabla 3

Contenido de vitamina C (mg ác. Ascórbico/100 g de muestra) en harina de mango ciruelo

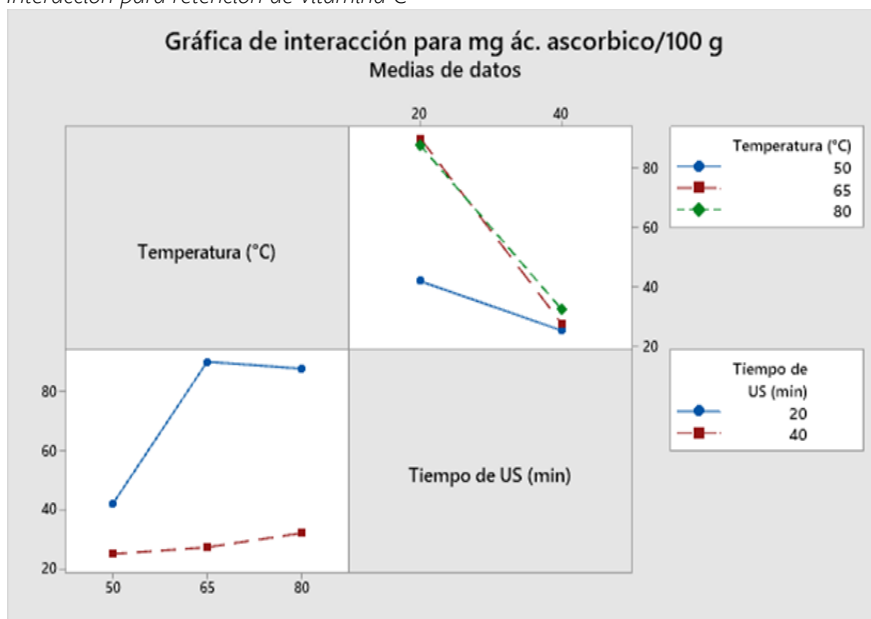
Tratamiento	Variable A:	Variable B	Contenido de Vitamina C
	Temperatura °C	Tiempo US (min)	
1	50	20	41.94 ± 3.71 cd
2	50	40	25.30 ± 3.79 d
3	65	20	90.05 ± 7.10 b
4	65	40	27.54 ± 3.68 cd
5	80	20	87.70 ± 7.40 b
6	80	40	32.34 ± 5.87 cd
1	50	20	41.94 ± 3.71 cd
2	50	40	25.30 ± 3.79 d
3	65	20	90.05 ± 7.10 b
Sin tratamiento por ultrasonido			
C1	50	-	164.02 ± 6.11 a
C2	65	-	158.0 ± 26.3 a
C3	80	-	55.99 ± 3.10 c

Nota: Medias \pm desviación estándar de la prueba Tukey, donde las mismas letras significan grupos homogéneos. El tratamiento a 50°C sin ultrasonido resultó en la mayor retención de vitamina C.

La gráfica de interacción (Figura 5) ilustra claramente el efecto negativo del incremento en el tiempo de exposición al ultrasonido sobre la retención de vitamina C. El análisis de efectos estandarizados (Figura 6) confirmó que el tiempo de exposición al ultrasonido fue el factor de mayor impacto sobre la degradación del ácido ascórbico.

Figura 5

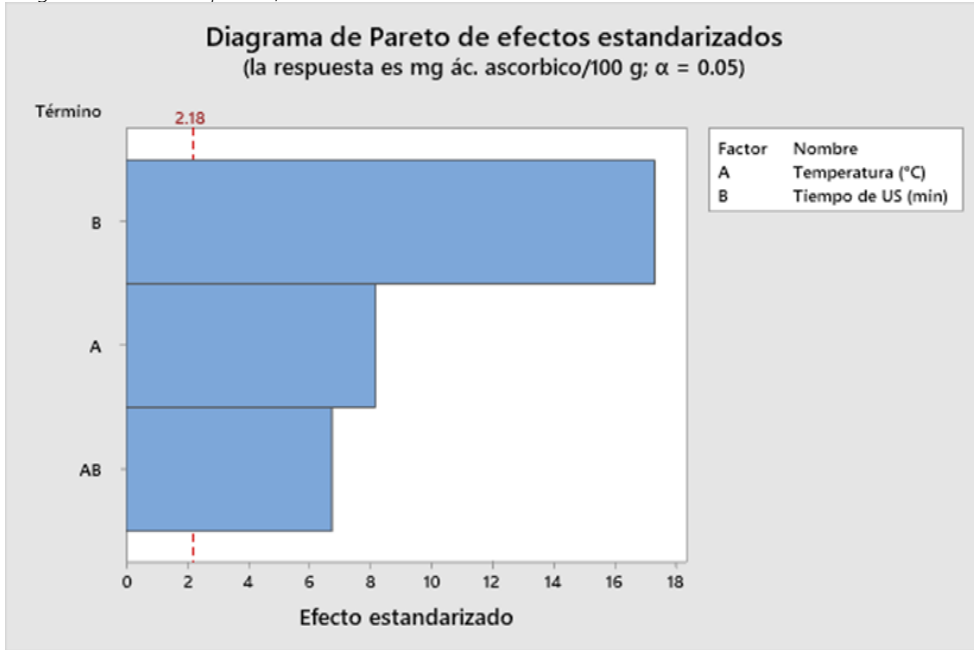
Interacción para retención de vitamina C



Nota. La obtención de harina de mango ciruelo con una mayor retención de vitamina C es posible al aplicar un secado a 65°C combinado con 20 minutos de tratamiento con ultrasonido a 37 kHz, en comparación con 40 minutos de pretratamiento con ultrasonido, donde la retención resulta considerablemente menor.

Figura 6

Diagrama de Pareto para efectos sobre vitamina C



Nota. La figura presenta el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados correspondientes a la temperatura de secado (A), el tiempo de exposición al ultrasonido (B) y su interacción (A*B). Se observa que la variable con mayor influencia sobre el contenido de AA es el tiempo de exposición al ultrasonido, seguido por la temperatura de secado.

3.4 Retención de compuestos fenólicos totales

Los compuestos fenólicos totales mostraron un patrón de degradación similar al observado para la vitamina C. Los tratamientos con 40 minutos de ultrasonido resultaron en las menores retenciones: 154.67 ± 14.44 mg GAE/100 g a 50°C, 142.44 ± 10.72 mg GAE/100 g a 65°C, y 146.15 ± 26.4 mg GAE/100 g a 80°C (Tabla 4).

Tabla 4

Contenido fenólico total (mg GAE/100 g de muestra) en harina de mango ciruelo

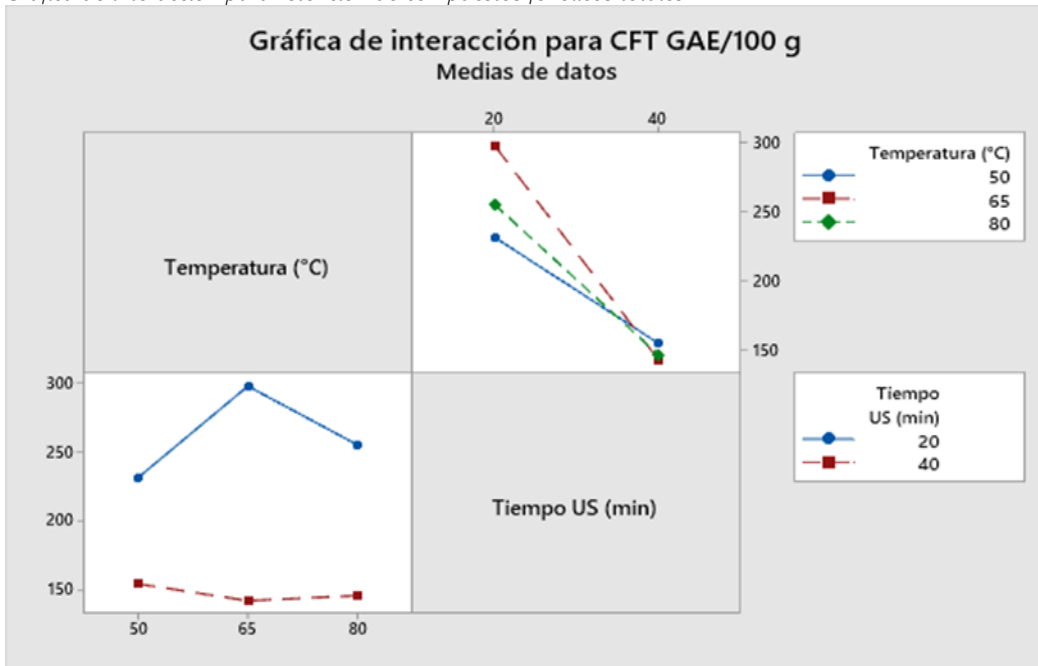
Tratamiento	Variable A: Temperatura °C	Variable B: Tiempo US (min)	Contenido fenólico total
1	50	20	231.33 ± 0 ^d
2	50	40	154.67 ± 14.44 ^e
3	65	20	297.63 ± 16.08 ^c
4	65	40	142.44 ± 10.72 ^e
5	80	20	255.04 ± 11.18 ^{cd}
6	80	40	146.15 ± 26.4 ^e
Sin tratamiento por ultrasonido			
C1	50	-	385.78 ± 12.05 ^b
C2	65	-	409.11 ± 12.51 ^b
C3	80	-	606.6 ± 43.11 ^a

Nota: Medias ± desviación estándar para la prueba de Tukey. Las letras iguales indican grupos homogéneos. La exposición al ultrasonido durante 40 minutos mostró la menor cantidad de compuestos fenólicos totales.

Los tratamientos con 20 minutos de exposición demostraron retenciones superiores, destacando el tratamiento a 65°C con 297.63 ± 16.08 mg GAE/100 g, seguido por 80°C (255.04 ± 11.18 mg GAE/100 g) y 50°C (231.33 ± 0 mg GAE/100 g). Las muestras control sin pretratamiento mantuvieron las concentraciones más altas de compuestos fenólicos, especialmente a 80°C (606.6 ± 43.11 mg GAE/100 g), seguido por 65°C (409.11 ± 12.51 mg GAE/100 g) y 50°C (385.78 ± 12.05 mg GAE/100 g).

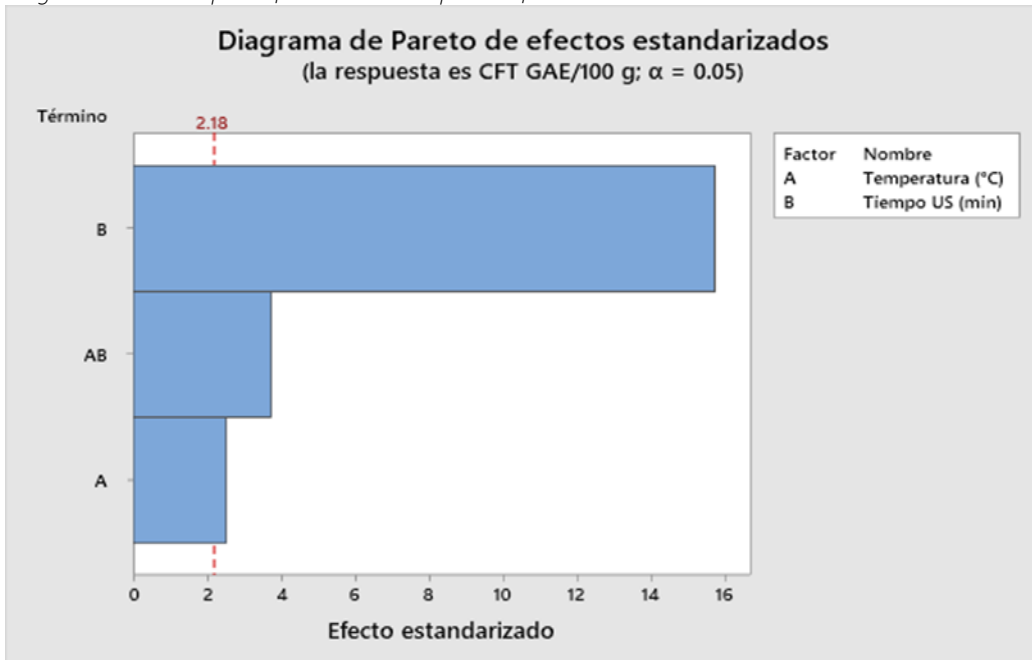
El gráfico de interacción (Figura 7) demuestra que la combinación de 65°C con 20 minutos de ultrasonido maximizó la retención de fenoles totales entre los tratamientos con pretratamiento. El diagrama de Pareto (Figura 8) confirmó que el tiempo de exposición al ultrasonido fue el factor predominante en la degradación de compuestos fenólicos.

Figura 7
Gráfica de interacción para retención de compuestos fenólicos totales



Nota. El secado a 65 °C combinado con 20 minutos de tratamiento con ultrasonido permite obtener harina de mango ciruelo con una mayor tasa de retención de compuestos fenólicos totales (CFT), en comparación con una exposición prolongada de 40 minutos, donde la retención disminuye.

Figura 8
Diagrama de Pareto para efectos sobre compuestos fenólicos totales



Nota. La figura presenta el diagrama de Pareto estandarizado correspondiente a la temperatura de secado (A), el tiempo de exposición al ultrasonido (B) y su interacción (A*B). Los resultados indican que el tiempo de exposición es el factor con mayor influencia sobre el contenido fenólico total.

Los resultados del presente estudio demuestran que el pretratamiento ultrasónico acelera significativamente la cinética de secado de *Spondias dulcis*, aunque con efectos adversos sobre la retención de compuestos bioactivos. Estos hallazgos contribuyen al conocimiento científico sobre el procesamiento de frutas tropicales subutilizadas y proporcionan información valiosa para la optimización de procesos de deshidratación.

4.1 Efectos del ultrasonido sobre la cinética de secado

La reducción del tiempo de secado observada en las muestras pretratadas con ultrasonido (hasta 96% a 50°C) confirma la efectividad de esta tecnología emergente para acelerar la transferencia de masa durante la deshidratación. Estos resultados concuerdan con investigaciones previas en otras matrices alimentarias. Nowacka et al. (2012) reportaron reducciones del 31-40% en el tiempo de secado de manzana tratada con ultrasonido a 35 kHz durante 30 minutos, mientras que Corrêa et al. (2016) observaron ahorros del 42- 55% en piña procesada con ultrasonido a 40 kHz.

El mecanismo subyacente a esta aceleración se atribuye al fenómeno de cavitación acústica, que genera compresiones y expansiones alternadas en el tejido vegetal, creando canales microscópicos que facilitan la eliminación de humedad intracelular mediante el "efecto esponja" (De la Fuente-Blanco et al., 2006; Soria & Villamiel, 2010). La mayor efectividad observada con tiempos de exposición prolongados (40 vs. 20 minutos) sugiere que la extensión del daño celular es proporcional a la duración del tratamiento ultrasónico.

La interacción sinérgica entre ultrasonido y temperatura evidenciada en este estudio coincide con los hallazgos de Bozkır y Rayman (2021), quienes reportaron mayor efectividad del pretratamiento ultrasónico a temperaturas elevadas en kiwi. Este efecto puede explicarse por la combinación de la disrupción mecánica inducida por el ultrasonido y el incremento en la movilidad molecular promovido por la temperatura, resultando en una transferencia de masa más eficiente.

4.2. Degradación de vitamina C

La pérdida significativa de ácido ascórbico observada en las muestras tratadas con ultrasonido, particularmente con exposiciones prolongadas (40 minutos), representa un hallazgo crítico para la optimización del proceso. Estos resultados contrastan parcialmente con estudios previos que reportaron efectos preservativos del ultrasonido. İzli y Yildiz (2021) observaron mayor retención de vitamina C en membrillo pretratado con ultrasonido, mientras que Bozkır y Rayman (2021) reportaron retenciones superiores en kiwi tratado ultrasónicamente.

Las discrepancias observadas pueden atribuirse a diferencias en las características de la matriz alimentaria, parámetros operacionales del ultrasonido y condiciones de secado. La estructura celular relativamente frágil de *S. dulcis* podría ser más susceptible al daño oxidativo inducido por cavitación prolongada. La generación de radicales libres durante la cavitación ultrasónica puede promover la oxidación del ácido ascórbico, especialmente cuando se combina con exposición térmica durante el secado posterior (Stojanovic & Silva, 2007).

La mayor retención observada en muestras control sin pretratamiento, aunque con tiempos de secado considerablemente mayores, sugiere que la minimización del estrés oxidativo mediante tiempos de procesamiento reducidos no compensa completamente los efectos deletéreos de la cavitación ultrasónica sobre la vitamina C. Este hallazgo subraya la importancia de optimizar cuidadosamente los parámetros de proceso para equilibrar eficiencia y calidad nutricional.

4.3. Degradación de compuestos fenólicos

El patrón de degradación observado para los compuestos fenólicos totales siguió una tendencia similar a la vitamina C, con pérdidas más pronunciadas en tratamientos de mayor duración. Sin embargo, las muestras control mantuvieron concentraciones superiores, particularmente a 80°C (606.6 mg GAE/100 g), lo que difiere de algunos estudios que reportan efectos protectivos del ultrasonido sobre polifenoles.

Önal et al. (2021) observaron mayor conservación de compuestos fenólicos en pera pretratada con ultrasonido a 35 kHz durante 10 minutos, sugiriendo que tiempos de exposición más cortos pueden ser más efectivos para preservar estos compuestos. Los resultados del presente estudio indican que exposiciones de 40 minutos a 37 kHz pueden exceder el umbral óptimo para la preservación de polifenoles en *S. dulcis*.

La pérdida de compuestos fenólicos durante el tratamiento ultrasónico prolongado puede atribuirse a varios mecanismos: (1) ruptura celular excesiva que expone los polifenoles a enzimas oxidativas, (2) formación de radicales libres durante la cavitación que promueven reacciones de oxidación, y (3) lixiviación de compuestos hidrosolubles durante el pretratamiento acuoso (Witrowa-Rajchert & Rząca, 2009).

5. CONCLUSIONES

Este estudio presenta la primera evaluación sistemática del pretratamiento ultrasónico en *Spondias dulcis*, demostrando que la aplicación de ultrasonido a 37 kHz acelera significativamente el proceso de secado convectivo, con reducciones del tiempo de procesamiento de hasta 96% comparado con muestras control. La condición más eficiente, utilizando 40 minutos de ultrasonido a 80°C, completó el secado en apenas 107 minutos, representando un considerable ahorro energético para aplicaciones industriales.

Sin embargo, el pretratamiento ultrasónico mostró efectos adversos sobre la retención de compuestos bioactivos, particularmente con exposiciones prolongadas que resultaron en pérdidas significativas de vitamina C y compuestos fenólicos totales. El tratamiento óptimo identificado, empleando 20 minutos de ultrasonido y 65°C de secado, logró un compromiso aceptable entre eficiencia energética y preservación nutricional, manteniendo 90.05 mg/100 g de ácido ascórbico y 297.63

mg GAE/100 g de fenoles totales.

Esta investigación amplía el conocimiento sobre tecnologías emergentes de procesamiento alimentario en frutas tropicales, contribuyendo a la comprensión de los mecanismos de degradación de compuestos termosensibles y proporcionando bases científicas para la valorización industrial de esta especie subutilizada. No obstante, el estudio presenta limitaciones importantes, incluyendo la evaluación de una sola frecuencia ultrasónica, análisis restringido a dos marcadores bioactivos y ausencia de caracterización microestructural y evaluación económica.

Las investigaciones futuras deberían explorar un rango más amplio de frecuencias ultrasónicas, tiempos de exposición más cortos, caracterización microestructural mediante microscopía electrónica, y evaluación integral de calidad sensorial y viabilidad económica. La extensión de esta metodología a otras frutas tropicales subutilizadas podría contribuir significativamente al desarrollo de cadenas de valor agregado, siempre que se optimicen cuidadosamente los parámetros operacionales para preservar el valor nutricional y funcional del producto final.

6. CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que la investigación se ha llevado a cabo en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses.

7. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

JAA: Redacción – revisión y edición, Redacción – borrador original, Investigación, Análisis formal, Conceptualización.
LAR-F, KSG-V y LAE-E: Redacción – revisión y edición, Visualización, Supervisión, Metodología, Investigación, Análisis formal, Curación de datos.

8. REFERENCIAS

- Baeghbali, V., Niakousari, M., & Ngadi, M. (2019). An update on applications of power ultrasound in drying food: A review. *Journal of Food Engineering and Technology*, 8(1), 29-38.
- Bozkır, H., & Rayman, A. (2021). Influence of ultrasonic and electrical pretreatments on the drying and quality characteristics of kiwi fruit slices. *Gida*, 46(4), 817-829.
- Cohen, J. S., & Yang, T. C. S. (1995). Progress in food dehydration. *Trends in Food Science & Technology*, 6(1), 20-25.
- Corrêa, J. L. G., Rasia, M. C., Garcia-Perez, J. V., Mulet, A., de Jesus Junqueira, J. R., & Cárcel, J. A. (2016). Use of ultrasound in the distilled water pretreatment and convective drying of pineapple. En *Drying and Energy Technologies* (pp. 71-87). Springer.
- De la Fuente-Blanco, S., Riera-Franco de Sarabia, E., Acosta-Aparicio, V. M., Blanco-Blanco, A., & Gallego-Juárez, J. A. (2006). Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, 44, e523-e527.
- Et, C. T., Hii, C. L., Ong, S. P., Law, C. L., Julkifle, A., Tan, K. W., & Tan, C. H. (2019). Convective air drying of *Spondias dulcis* and product quality. *International Journal of Food Engineering*, 15(3-4), 2018-0228.
- Favier, J. C., Ireland-Ripeit, J., Laussuc, C., & Feinberg, M. (1993). *Repertoire generale des aliments, Tome 3. Table de composition des fruits exotiques, fruits de cueillette d'Afrique*. ORSTOM, INRA, Technique & Documentation.
- Graham, O. S., Mohammed, M., & Wickham, L. D. (2004). Effects of heat treatments on the quality of miniature golden apples (*Spondias cytherea* Sonn) during low temperature storage. *Food, Agriculture & Environment*, 2(2), 48-53.
- Ishak, S. A., Ismail, N., Mohd Noor, M. A., & Ahmad, H. (2005). Some physical and chemical properties of ambarella (*Spondias cytherea* Sonn.) at three different stages of maturity. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18(8), 819-827.
- İzli, G., & Yildiz, G. (2021). Evaluation of high intensity ultrasound pretreatment effects on the physical properties and bioactive compounds of convective dried quince samples. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 645-656.
- Kalt, W. (2005). Effects of production and processing factors on major fruit and vegetable antioxidants. *Journal of Food Science*, 70(1), R11-R19.
- Miranda, M., Maureira, H., Rodríguez, K., & Vega-Gálvez, A. (2009). Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering*, 91(2), 297-304.

- Morton, J. F. (1987). Ambarella. En *Fruits of warm climates* (pp. 240-242). Flair Books.
- Mothibe, K. J., Zhang, M., Nsor-Atindana, J., & Wang, Y. C. (2011). Use of ultrasound pretreatment in drying of fruits: Drying rates, quality attributes, and shelf life extension. *Drying Technology*, 29(14), 1611-1621.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Śledź, M., Jurek, N., & Witrowa-Rajchert, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113(3), 427-433.
- Önal, B., Adiletta, G., Di Matteo, M., Russo, P., Ramos, I. N., & Silva, C. L. (2021). Microwave and ultrasound pretreatments for "Rocha" pear drying: Impact on phytochemical parameters, color changes, and drying kinetics. *Foods*, 10(4), 853.
- Programa Qali Warma. (2022). Catálogo de especificaciones técnicas de alimentos del Programa Nacional de Alimentación Escolar Qali Warma, Harina de Frutas (Versión N° 02).
- Ruiz Flores, L. A. (2022). Harina de mango (*Mangifera indica*): Efecto del secado convencional sobre el contenido de compuestos bioactivos [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Frontera].
- Soria, A. C., & Villamiel, M. (2010). Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 323-331.
- Stojanovic, J., & Silva, J. L. (2007). Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. *Food Chemistry*, 101(3), 898-906.
- Witrowa-Rajchert, D., & Rząca, M. (2009). Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. *Drying Technology*, 27(7-8), 903-909.
- Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1239-1255.

9. DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el presente estudio forman parte de la tesis titulada "Influencia de la temperatura y tratamiento por ultrasonido en la conservación de fitoquímicos de la harina de mango ciruelo (*Spondias dulcis* Parkinson)", disponible en el Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Frontera en el siguiente enlace: <https://repositorio.unf.edu.pe/items/7a34cad2-39ab-4e1f-8b61-f62d638c484f>