



**EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE SECADO SOBRE PROPIEDADES
FISICOQUÍMICAS Y FUNCIONALES DE LA CÁSCARA DE MANDARINA (*Citrus
reticulata*)**

Autores:

YELI VALENTINA ZEA NARVAEZ

202026335

JUAN CAMILO TUQUERRES PINEDA

201941405

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros de Alimentos

Director:

ALFREDO AYALA APONTE, Ph.D.

Codirectora:

NADEZDA MOREIRA, Ing.

Ingeniería de Alimentos

Facultad de Ingeniería

Universidad del Valle

Cali - Colombia

2025

DEDICATORIA

Dedico este logro a mis padres, Isabel y Alier, por ser mi base y mi refugio. Su apoyo incondicional y su ejemplo de esfuerzo y perseverancia han sido fundamentales en esta etapa. A mis hermanos Mayra, Yuri y Jorge, quienes han sido una compañía constante en este largo camino, gracias por sus palabras de aliento, su cariño y por celebrar conmigo cada pequeño avance.

Yeli Valentina Zea Narvaez

Dedico este trabajo y este logro con gran agradecimiento a mi familia, mis padres Francely y Francisco, a mi hermano Daniel y de manera muy especial a mi pareja Karen, quienes con amor han hecho parte de este proceso de inicio a fin, brindándome su apoyo incondicional, su paciencia y sus palabras de aliento en cada etapa de la elaboración de este trabajo. También agradezco a mis profesores y compañeros quienes con sus enseñanzas, experiencia y compañía han contribuido de manera significativa a mi crecimiento personal y profesional.

Juan Camilo Tuquerres Pineda

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, por guiarnos, fortalecernos y acompañarnos en cada etapa de esta experiencia, permitiéndonos llegar hasta aquí con perseverancia y propósito. A la Universidad del Valle, nuestro profundo agradecimiento por permitirnos hacer parte de esta institución y por ofrecernos una formación pública de calidad.

A nuestro director Alfredo Ayala Aponte, nuestro más sincero agradecimiento por su compromiso, dedicación y acompañamiento constante a lo largo del desarrollo de este trabajo. Su orientación, experiencia y disposición fueron fundamentales para alcanzar los objetivos planteados. También a nuestra codirectora Nadezda Moreira, por su valiosa guía durante todo el proceso, aportándonos conocimientos clave, herramientas metodológicas y confianza para llevar adelante este proyecto.

A los docentes que han formado parte de nuestra trayectoria académica, quienes, con sus enseñanzas y apoyo, enriquecieron no solo este proyecto, sino también nuestro proceso de formación profesional. A todo el personal de la Escuela de Ingeniería de Alimentos, por su disposición y apoyo constante. Especialmente a Rigo Alberto Magón, Alberto Díaz, Laura Torres y Cristina Ramírez, por facilitarnos el acceso a los laboratorios y por su acompañamiento técnico y humano; sin su ayuda, esto no hubiera sido posible.

Gracias también a nuestros compañeros, quienes compartieron este camino con nosotros y nos brindaron su ayuda y consejos de manera generosa y desinteresada.

Finalmente, la gratitud va para nuestras familias, por su amor, apoyo incondicional y por ser siempre nuestro motor. Su presencia, palabras de aliento y confianza fueron esenciales para culminar este proceso.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)	11
2.1.1 Subproductos de la mandarina	12
2.1.2 Composición química de la cáscara de mandarina.....	12
2.2. Secado	14
2.2.1. Secado Solar (SS).....	15
2.2.2. Secado por Aire Caliente (SCA ó SAC)	15
2.2.3. Secado por Ventana de Refractancia (VR)	15
3. ANTECEDENTES	16
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
4.1. Pregunta de investigación.....	20
5. JUSTIFICACIÓN	21
6. HIPÓTESIS	21
7. OBJETIVOS.....	22
7.1. Objetivo general	22
7.2. Objetivos específicos.....	22
8. MATERIALES Y METODOS.....	22
8.1. Materiales.....	22
8.2. Diseño de experimentos	22
8.2.1. Diseño experimental para secado por aire caliente	23
8.2.2. Diseño experimental para secado por ventana de refractancia	23
8.3. Métodos de secado	23
8.3.1. Secado solar (SS)	23
8.3.2. Secado convectivo por aire caliente SCA	24
8.3.3. Secado por ventana de refractancia VR	25
8.3.4. Coeficiente de difusión, energía de activación y modelación matemática de las cinéticas del secado.	25
8.4. Análisis fisicoquímicos	27
8.4.1. Contenido de humedad	27
8.4.2. Cambio de color.....	28

8.4.3.	<i>Actividad de agua (a_w)</i>	28
8.4.4.	<i>Compuestos fenólicos totales (CFT)</i>	28
8.4.5.	<i>Capacidad antioxidante (CA) y porcentaje de inhibición</i>	29
8.5.	<i>Análisis estadístico</i>	29
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
9.1.	Contenido de humedad (cinéticas de secado)	30
9.1.1.	<i>Coeficientes de difusión</i>	33
9.1.2.	<i>Energía de activación E_a</i>	34
9.1.3.	<i>Modelos cinéticos de secado</i>	35
9.2.	Análisis fisicoquímicos	38
9.2.1.	<i>Cambio en el color</i>	38
9.2.2.	<i>Actividad de Agua (a_w)</i>	39
9.2.3.	<i>Compuestos fenólicos totales (CFT)</i>	41
9.2.4.	<i>Porcentaje de inhibición y capacidad antioxidante (CA)</i>	42
10.	CONCLUSIONES	46
11.	REFERENCIAS	47

Lista de figuras

Figura 1. Tabla de color de la naranja Valencia por encima de 900 m.s.n.m. Fuente: ICONTEC, (1997).....	11
Figura 2. Montaje del secado solar de las cáscaras de mandarina.	24
Figura 3. Secador convectivo con aire caliente (Armfield, USA).	24
Figura 4. Ventana de refractancia de laboratorio (CEI-ROBOTS, Col).....	25
Figura 5. Curva de secado de cáscara de mandarina por el método SS (30 °C y 55 % HR).	30
Figura 6. Curvas de secado de cáscaras de mandarina por el método de SCA a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C).	31
Figura 7. Curvas de secado de cáscaras de mandarina por el método de VR a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C).	31
Figura 8. Comparación de curvas de secado de cáscaras de mandarina a 50 °C.	32
Figura 9. Comparación de curvas de secado de cáscaras de mandarina a 60 °C.	32
Figura 10. Comparación de curvas de secado de cáscaras de mandarina a 70 °C.	33
Figura 11. Curvas de secado por el modelo de Page modificado en SS.	37
Figura 12. Curvas de secado por el modelo de Page modificado en SCA.....	37
Figura 13. Curvas de secado por el modelo de Page modificado en VR.	38
Figura 14. Porcentaje de Inhibición por cada tratamiento, fresco y seco.	44
Figura 15. Curva de calibración para componentes fenólicos totales.....	56
Figura 16. Curva de calibración para capacidad antioxidante.	56

Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de la cáscara de mandarina.	13
Tabla 2. Compuestos bioactivos presentes en cáscaras de diferentes tipos de mandarina.	14
Tabla 3. Recientes estudios realizados sobre el efecto del secado en las propiedades fisicoquímicas y compuestos funcionales en cáscaras de cítricos.....	17
Tabla 4. Diseño experimental para el secado por aire caliente.....	23
Tabla 5. Diseño experimental para el secado por ventana de refractancia.	23
Tabla 6 Modelos de cinéticas de secado.	26
Tabla 7. Coeficientes de difusión.....	34
Tabla 8. Energía de activación para cada método de secado.	34
Tabla 9. Parámetros cinéticos estimados por distintos modelos matemáticos en cáscara de mandarina.....	35
Tabla 10. Parámetros L*, a* y b* de cáscaras de mandarina secas a humedad 11% (b.h.) para los tres métodos de secado.....	39
Tabla 11. Cambio total de color (ΔE) de las cáscaras de mandarina secas 11% (b.h) para los tres métodos de secado.	39
Tabla 12. Actividad de agua de muestras de cáscaras de mandarina secadas a humedad del 11% (b.h.).....	40
Tabla 13. Contenido de compuestos fenólicos totales en cáscaras de mandarina y seca (11 ± 1 % b.h.).	42
Tabla 14. Porcentaje de inhibición en cáscaras de mandarina secas a humedad 11 % (b.h.).....	43

RESUMEN

La industria de procesamiento de cítricos genera volúmenes significativos de residuos, entre los cuales se encuentran las cáscaras de mandarina (*Citrus reticulata*). Su disposición inadecuada representa un riesgo potencial de contaminación ambiental. Estos subproductos contienen compuestos bioactivos con aplicaciones potenciales en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética. Por ello, es necesario identificar alternativas que permitan su aprovechamiento. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de tres métodos de secado: (SS) solar (temperatura promedio de: 30 °C, humedad relativa promedio: 55 %), (SAC) por aire caliente (a temperaturas de 50, 60 y 70 °C y una velocidad de aire promedio de 1,5 m/s) y por (VR) ventana de refractancia (temperaturas 50, 60 y 70 °C), sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la cáscara de mandarina. Se determinaron las cinéticas de secado, así como parámetros fisicoquímicos (color y la actividad de agua) y funcionales (compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante) ajustados al 11 % de humedad en base húmeda (b.h.). El secado por VR fue el método significativamente más eficiente para la deshidratación de cáscaras de mandarina, al presentar el menor tiempo de secado, energías de activación más bajas ($12,90 \pm 1,32$ kJ/mol) y coeficientes de difusión significativamente superiores ($8,51 \times 10^{-10} \pm 0,03$ m²/s). Los valores de actividad de agua en muestras tratadas con VR oscilaron entre $0,5245 \pm 0,03$ y $0,5377 \pm 0,03$. En cuanto al color se obtuvo que, la temperatura no influyó directamente en el color de las muestras. En cuanto a los parámetros funcionales, dentro del mismo método de secado (VR), el tratamiento a 70 °C presentó la mayor retención de compuestos fenólicos totales ($10,24 \pm 0,26$ mg GAE/g m.s.), mientras que a 60 °C se obtuvo el mayor porcentaje de inhibición antioxidante ($68,64 \pm 1,06$ % correspondiente a $5,345 \pm 0,103$ μmol Eq Trolox/ g m.s.). Estos resultados evidencian que el secado por ventana de refractancia fue la técnica más eficiente de secado, al reducir el tiempo de proceso, con mayor retención de propiedades funcionales, garantizando estabilidad microbiológica durante el almacenamiento.

Palabras clave: cáscara de mandarina, secado, humedad, color, compuestos fenólicos, capacidad antioxidante.

1. INTRODUCCIÓN

La industria frutícola y hortícola en Colombia representa un sector con alto potencial, favorecido por condiciones climáticas propicias para la producción eficiente de materias primas vegetales (Martínez & Pechene, 2017). Sin embargo, durante el procesamiento de estos productos alimenticios se generan residuos orgánicos como cáscaras, semillas y pulpas descartadas, los cuales se clasifican como subproductos. La disposición inadecuada de estos residuos genera actualmente problemas de contaminación en el entorno. La gestión de dichos subproductos representa un desafío para la industria alimentaria debido a las limitaciones técnicas y económicas, así como al impacto ambiental asociado a su valorización. Aunque se han promovido iniciativas para su aprovechamiento, la valorización de los subproductos generados en la industria hortícola se ve limitado principalmente por los altos costos relacionados con su recolección, transformación y acondicionamiento (Aguilar et al., 2021).

En la actualidad, se reconoce la necesidad de desarrollar e implementar estrategias eficientes para el aprovechamiento de subproductos agroindustriales, con el fin de reducir el impacto ambiental y generar valor agregado. A nivel mundial, la producción de cítricos supera los 102 millones de toneladas anuales, de las cuales una fracción significativa se destina a la agroindustria, generando aproximadamente 10 millones de toneladas de residuos como cáscaras, semillas y pulpa (Dubey et al., 2023). En Colombia, el cultivo de mandarina ha mostrado un crecimiento notable, pasando de 109768 toneladas en 2010 a 348453 toneladas en 2018 (Aguilar Niño et al., 2012; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Durante el procesamiento, hasta un 50 % del peso de la fruta corresponde a los subproductos, especialmente al epicarpio (Ordoñez et al., 2020), lo que representa una oportunidad para su valorización.

La cáscara de mandarina representa una materia prima de alto interés debido a su composición. Contienen vitaminas, fibra dietaria, lípidos, azúcares y compuestos fenólicos con actividad antioxidante, los cuales pueden ser identificados y cuantificados mediante análisis fisicoquímicos y bromatológicos. Estas propiedades funcionales permiten proyectar su aprovechamiento en la formulación de ingredientes funcionales o materias primas con aplicaciones en la industria alimentaria (bebidas, lácteos, panadería), así como en los sectores farmacéutico y cosmético (Flórez-Montes et al., 2022; Ghanem et al., 2012).

El secado es un proceso utilizado para reducir la actividad de agua y el contenido de humedad de los materiales, lo cual permite obtener productos con mayor estabilidad microbiológica, inactivación enzimática y vida útil prolongada, a través de la transformación de la materia prima (Wang et al., 2023). Por tanto, el secado de residuos agroindustriales, como la cáscara de mandarina, representa una alternativa viable para su conservación y valorización.

Tradicionalmente, se han empleado métodos convencionales como el secado solar y por aire caliente (SCA), los cuales requieren tiempos prolongados de operación. El SCA presenta altos costos energéticos y demanda procesos extensos de acondicionamiento de la materia prima. Además, estos sistemas presentan limitaciones importantes, como una calidad heterogénea del producto final y alteraciones significativas en sus propiedades físicas y químicas (Mujumdar & Law, 2010). Ante estas restricciones, surge la necesidad de explorar tecnologías de secado alternativas que permitan conservar de manera eficiente las características del producto, reduciendo el tiempo de proceso y el consumo energético.

Entre las tecnologías emergentes se encuentra el secado por ventana de refractancia, caracterizado por su bajo costo operativo, corto tiempo de residencia y temperaturas de procesamiento inferiores a las de los métodos convencionales. Estas condiciones favorecen la conservación de las propiedades fisicoquímicas de los productos alimenticios (Zotarelli et al., 2015). Además, este método ofrece un mayor control del proceso y una distribución uniforme del calor sobre la superficie del material. Autores como Suri et al., (2024), Shu et al., (2020), Rafiq et al., (2019), Xu et al., (2017), Ghanem et al., (2012) han evaluado diversos métodos de secado de cáscaras de mandarina como aire caliente, infrarrojo, microondas, vacío, solar y liofilización en parámetros de calidad, retención de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, propiedades fisicoquímicas y tecnológicas, así como en la composición química. Sin embargo, no se han encontrado estudios en los que se evalúen el secado por ventana de refractancia y su impacto en dichos parámetros, por lo que esta técnica representa un tópico de investigación con potencial para optimizar la valorización de este subproducto agroindustrial.

El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de los métodos de secado solar, convectivo con aire caliente y por ventana de refractancia sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la cáscara de mandarina (*Citrus reticulata*).

2. MARCO TEÓRICO

Los cítricos constituyen uno de los cultivos frutales de mayor importancia y son ampliamente distribuidos alrededor del mundo, con una producción que abarca a más de 140 países. Dentro de las variedades mayormente cultivadas se han destacado las naranjas que representan más del 50% de la producción global, seguida por la mandarina, limones y pomelos. Los cítricos son valorados tanto por su aporte nutricional, especialmente en vitamina C y fibra, como por su importancia comercial. Además de su consumo directo como fruta fresca, los cítricos son empleados en la fabricación de jugos, aceites esenciales y diversos derivados, lo que contribuye a incrementar el valor económico del sector (economías locales y exportaciones) (FAO, 2021). Lo cual resalta la necesidad de implementar mejoras tecnológicas y de modernizar los procesos productivos, con el fin de fortalecer la competitividad en los mercados internacionales (SENASICA; Gobierno de México, 2022).

2.1. Mandarina (*Citrus reticulata*)

Es un fruto de origen en china y el sudeste asiático con una producción anual aproximada a los 102 millones de toneladas en el mundo, de tamaño pequeño, achatado y de piel fina (permite su fácil pelado) (He et al., 2022). En cuanto a su color, este varía durante el proceso de maduración, iniciando con tonalidades verdes hasta tonalidades naranjas. Según criterios de madurez establecidos por la NTC 4086 para cítricos como la naranja Valencia, se reconocen diferentes estados de coloración: desde el color 0 (verde oscuro) hasta el color 6 (completamente anaranjado), (Figura 1) (ICONTEC, 1997).



Figura 1. Tabla de color de la naranja Valencia por encima de 900 m.s.n.m. Fuente: ICONTEC, (1997).

La fitotomía indica que las mandarinas se componen de un exocarpio el cual contiene la epidermis y el flavedo (los cuales contienen sacos que producen aceites aromáticos), el albedo (capa que simula una esponja que es fuente de flavanona) y los haces vasculares. Las membranas que separan las secciones de jugo y semillas en la mandarina, y que se unen en el centro de la fruta, forman parte del endocarpio (Maciel et al., 2023).

Su composición química depende principalmente del nivel de madurez, el almacenamiento, las condiciones hortícolas y climáticas que la mandarina presente impacta el perfil químico de la fruta. Se caracteriza por un bajo contenido de proteínas y lípidos, siendo los carbohidratos (sacarosa, glucosa y fructosa) el macronutriente predominante (He et al., 2022). El albedo de la cáscara de mandarina presenta un elevado contenido de fibra dietética, constituida principalmente por celulosa, lignina y pectina esta última con capacidad gelificante y reductora de colesterol de lipoproteínas de baja densidad (LDL). Entre los ácidos orgánicos predominantes destaca el ácido cítrico, aunque también se han identificado presencia de ácido málico (Maciel et al., 2023). Además de su sabor y aroma característicos, las mandarinas contienen diversos metabolitos secundarios con valor funcional, tales como aceites esenciales; flavonoides especialmente hesperidina, concentrada en la cáscara; ácidos fenólicos; alcaloides; limonoides; y carotenoides. En particular, los flavonoides han mostrado actividad antioxidante, la cual se ha relacionado con efectos anticancerígenos y antiinflamatorios (Peng et al., 2025; Zhang et al., 2014).

2.1.1 Subproductos de la mandarina

Los subproductos, clasificados dentro de los residuos sólidos y semisólidos, están compuestos principalmente por restos del endocarpio y el exocarpio, incluyendo semillas, fibras, membranas y vesículas. Estos residuos presentan actividad biológica y enzimática, y contienen niveles elevados de lípidos, fibra dietética, carbohidratos, ácidos orgánicos, minerales, aceites esenciales, aminoácidos, vitaminas y flavonoides, compuestos de interés para la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Abeyasinghe et al., 2007). La valorización de estos compuestos requiere su extracción desde la matriz que los contiene, la cual puede corresponder a materiales sin procesar o a residuos generados durante el procesamiento. Actualmente, los residuos de mandarina presentan potencial de aprovechamiento en el desarrollo de nuevos productos en la industria alimentaria, tales como mermeladas, bebidas bajas en calorías, antioxidantes y probióticos a base de mosto, jugos elaborados a partir de polvo de mandarina obtenido mediante secado por aspersión y productos extruidos. Asimismo, se han identificado aplicaciones potenciales en la formulación de conservantes, estabilizantes, películas comestibles, suplementos nutricionales, biofertilizantes, entre otros productos de interés industrial (Maciel et al., 2023).

2.1.2 Composición química de la cáscara de mandarina

La cáscara de los cítricos son fuentes de antioxidantes naturales (flavonoides como hesperidina y neohesperidina, carotenoides, polifenoles, aceites esenciales y pectina), los principales fitoquímicos que se encuentran presentes en la cáscara de mandarina son los flavones, dentro de sus componentes fenólicos predomina el ácido gálico (Ramadan & Farag, 2022). En la Tabla 1 se presenta la composición química de las cáscaras de mandarina y en la Tabla 2 se presentan los componentes bioactivos presentes en las cáscaras de mandarina de variedad Clemenvilla, Nadorcott, Ortanica los datos fueron obtenidos por medio de la extracción asistida por ultrasonido (20kHz, 400W, 40°C), en donde se utilizó etanol acuoso (50% v/v) como disolvente.

Tabla 1. Composición química de la cáscara de mandarina.

Compuesto	Valor base seca (b.s.)	Valor base húmeda (b.h.)
	Tomado de Marín et al., (2007)	Tomado de Mohamed et al. (2024)
Humedad	-	73,47±0,49 ^a
Ceniza	10,03 ± 0,15 ^a	-
Azúcar	8,50 ± 0,20 ^a	-
Grasa	1,57 ± 0,06 ^a	0,63±0,06 ^a
Proteína	7,33 ± 0,33 ^a	-
Fenoles	-	991,39±13,23 ^b
Flavonoides	3,06 ± 0,06 ^a	702,71 ± 19 ^b
Pectina	2,58 ± 0,22 ^a	-
Lignina	13,54 ± 1,26 ^a	-
Taninos	-	3,13 ± 0,05 ^a
Actividad antioxidante	-	23,12 ± 0,6 ^c
Celulosa	30,53 ± 2,35 ^a	-
Hemicelulosa	11,04 ± 0,98 ^a	-

*Consideraciones de unidades: ^a (%); ^b (mg/100g); ^c (mmol/kg)

Tabla 2. Compuestos bioactivos presentes en cáscaras de diferentes tipos de mandarina.

Compuesto bioactivo	Tiempo de extracción (min)	Clemenvilla	Nadorcott	Ortanica
TPC (mg GAE/100 g PF $\pm$ DE)	5	602 $\pm$ 99	611 $\pm$ 113	809 $\pm$ 193
	15	770 $\pm$ 178	713 $\pm$ 115	1047 $\pm$ 251
	30	952 $\pm$ 168	944 $\pm$ 215	1230 $\pm$ 310
TF (mg CE/100g PF $\pm$ DE)	5	43,2 $\pm$ 13,8	41,7 $\pm$ 8,4	44,0 $\pm$ 13,1
	15	58,5 $\pm$ 22,4	57,6 $\pm$ 10,8	59,0 $\pm$ 17,0
	30	76,7 $\pm$ 22,4	69,0 $\pm$ 13,3	67,4 $\pm$ 17,7
CT (μ g de β -caroteno/100 g PF $\pm$ DE)	5	2852 $\pm$ 1372	3662 $\pm$ 1729	3222 $\pm$ 1214
	15	3860 $\pm$ 1930	6250 $\pm$ 3191	5191 $\pm$ 1385
	30	5245 $\pm$ 2180	8173 $\pm$ 4547	5909 $\pm$ 2638
AA (mg/100g PF $\pm$ DE)	5	105 $\pm$ 50	63,4 $\pm$ 22,2	72,0 $\pm$ 32,3
	15	124 $\pm$ 59	75,0 $\pm$ 21,0	88,5 $\pm$ 32,3
	30	136 $\pm$ 56	76,0 $\pm$ 24,0	92,7 $\pm$ 42,1

TPC: compuestos fenólicos totales; GAE: equivalente de ácido gálico; PF: peso fresco; SD: desviación estándar, TF: flavonoides totales, CE: equivalente de catequina; CT: carotenoides totales; AA: ácido ascórbico. DE: desviación estándar. Fuente: Anticona et al., (2021).

2.2. Secado

El secado es una de las operaciones unitarias más antiguas e importantes en el procesamiento de alimentos. Esta se emplea para reducir el contenido de humedad de la matriz alimentaria, con el fin de mejorar su conservación. Al disminuir la humedad, se inhibe o reduce la actividad microbiana y enzimática, lo que contribuye a prolongar la vida útil del producto y a preservar su calidad (Shiny et al., 2021; Artunduaga et al., 2021).

Uno de los primeros métodos de secado utilizados para la conservación de alimentos fue el secado solar, pero con el paso del tiempo se han desarrollado tecnologías que se han clasificado en cuatro generaciones. La primera generación se tienen los secadores tipo gabinete y lecho, como hornos, bandejas, bandejas para camiones, transportadores de flujo giratorio y túneles que utilizan aire caliente como medio de transferencia de calor, en la segunda generación se encuentran los secadores por aspersión y de tambor, por otro lado la deshidratación por drenaje y la deshidratación osmótica pertenecen a la tercera generación de tecnologías de secado, además se tiene el secado por microondas, infrarrojos, el secado con bomba de calor, lecho fluidizado por radiofrecuencia y el secado por ventana de refractancia (RWTM), clasificadas como tecnologías de secado de cuarta

generación según el tipo de materias primas que pueden manejar y la retención de los atributos de calidad del producto (Raghavi et al., 2018).

Independientemente del método a emplear para deshidratar un alimento, existen variables como la temperatura, velocidad de aire caliente y tiempo, dentro del proceso que inciden sobre la matriz alimentaria, influyen en las características del producto final, como el color, la textura, el valor nutricional y la cantidad de agua (Padilla-Frias et al., 2018).

2.2.1. Secado Solar (SS)

El secado solar es uno de los métodos más antiguos de deshidratación, en el cual la energía térmica proviene directamente de la radiación solar. En este proceso, el producto se expone a la luz solar de forma directa, lo que facilita la evaporación del contenido de humedad. Sin embargo, en la actualidad su uso en el sector industrial es limitado, ya que presenta desventajas, como tiempos prolongados, no permite un control preciso de la temperatura ni condiciones de operación constantes debido a la variabilidad climática, lo que deriva en productos con calidad heterogénea e inestable. A pesar de estas limitaciones, el secado solar sigue siendo una alternativa de bajo costo energético en comparación con otros métodos de secado (Shiny et al., 2021; Xu et al., 2017).

2.2.2. Secado por Aire Caliente (SCA ó SAC)

El secado por aire caliente, o secado convectivo, es uno de los métodos más utilizados a nivel industrial para la conservación de frutas, debido a sus bajos costos operativos y a la simplicidad de la tecnología empleada. Sin embargo, generalmente se utilizan temperaturas superiores a 60 °C durante tiempos prolongados de operación, lo que puede generar costos energéticos elevados y afectar negativamente la calidad comercial del producto final (Rivera et al., 2019).

En este método, el calor ingresa a la matriz alimentaria por una corriente de aire caliente, donde es transferido a la superficie del producto por convección y luego dentro del mismo por difusión o convección, dependiendo de su estructura (Artunduaga et al., 2021).

La cinética del proceso de secado utilizando aire caliente depende tanto de la geometría y espesor del producto como de las propiedades del aire de secado, como son la humedad relativa ambiental, temperatura y velocidad del flujo de aire (García et al., 2013).

2.2.3. Secado por Ventana de Refractancia (VR)

El secado por ventana de refractancia es una tecnología emergente que utiliza la energía infrarroja del agua para deshidratar productos alimenticios. Este proceso emplea agua caliente a temperaturas inferiores al punto de ebullición y a presión atmosférica, la cual transfiere energía térmica al material a secar. Durante el secado, los productos húmedos y de consistencia pulposa se extienden en una capa delgada y uniforme sobre una lámina plástica transparente a la radiación infrarroja, fabricada en Mylar, un tipo de poliéster. La interfaz entre la lámina y la humedad del producto genera una “ventana” que permite el paso eficiente de la energía infrarroja. De este modo, la

energía térmica del agua caliente situada debajo se transmite a través del material plástico, favoreciendo el secado del alimento distribuido en forma de película delgada sobre su superficie (Gebeyehu et al., 2025).

Esta tecnología tiene como ventaja la alta retención en calidad nutricional, fisicoquímica y organoléptica en comparación con otros métodos de secado, ya que no permite que el producto alcance temperaturas altas y los tiempos de proceso son cortos ya que están involucrados los tres modos de transferencia de calor; además no genera subproductos ni emisiones que contaminen el ambiente y contribuye al ahorro energético debido a su alta velocidad de secado. Por estas razones, el secado con ventana de refractancia se ha convertido en una técnica innovadora que permite la deshidratación de alimentos termosensibles (González-Hoyos et al., 2021; Rivera et al., 2019).

3. ANTECEDENTES

El secado se ha consolidado como una de las principales tecnologías de conservación para frutas, verduras y subproductos vegetales. En el caso de los cítricos, esta técnica permite reducir la actividad del agua, prolongar la vida útil y facilitar el aprovechamiento de las cáscaras como fuente de compuestos funcionales. Diversos estudios han señalado que estos residuos contienen metabolitos bioactivos como aceites esenciales, flavonoides (especialmente hesperidina), ácidos fenólicos, limonoides, carotenoides y alcaloides, los cuales pueden verse afectados por el tipo de tratamiento térmico aplicado (Ni et al., 2024). No obstante, la eficiencia del secado depende de múltiples factores, entre ellos la técnica empleada, la temperatura, el tiempo de exposición y las características del material vegetal (Calín et al., 2020).

Recientemente, Fernandes et al. (2025) compararon el efecto del secado por liofilización y en horno a 60 °C sobre la cáscara y pulpa de naranja Kumquat, observando que el secado en horno ofreció un mayor rendimiento (>20 %) y un mayor impacto en el color, aunque presentó un menor contenido lipídico. En cambio, no se encontraron diferencias significativas en los contenidos de proteína y fibra. De forma complementaria, Wang et al. (2023) analizaron métodos similares de secado: liofilización (FD), con bomba de calor (HPD), por microondas (MD) y por infrarrojo lejano (FID) en cáscaras de naranja, encontrando que la liofilización permitió conservar mayores niveles de ácido ascórbico, carotenoides y fenoles totales, mientras que el secado por microondas favoreció la biodisponibilidad de compuestos funcionales.

En la literatura científica se evidencian estudios sobre el secado de cáscara en diferentes cítricos. En la Tabla 3 se presentan algunas investigaciones sobre el secado de la cáscara de cítricos por distintos métodos.

Tabla 3. Recientes estudios realizados sobre el efecto del secado en las propiedades fisicoquímicas y compuestos funcionales en cáscaras de cítricos.

Objetivos	Metodología	Resultados y conclusiones	Autor (es)
Evaluar el efecto del secado por infrarrojo (IDR) a distintas temperaturas en los parámetros de calidad de la cáscara de mandarina Kinnow	Secado por infrarrojo a 50, 60 y 70 °C y una velocidad de aire de 2,0 m/s	La temperatura mostró un efecto significativo en el contenido total de fenoles (TPC) de las cáscaras de kinnow. A 60°C se logró una mejor retención de fitoquímicos (fenoles, flavonoides y carotenoides), antioxidantes y atributos de color de las cáscaras. El modelo de Page modificado fue el que mostró un mejor ajuste, con valores de R ² más altos en todas las condiciones de temperatura	Suri et al., (2024)
Evaluar el efecto de diferentes técnicas de secado (bandeja, infrarrojos al vacío y microondas al vacío) sobre la cinética de secado, las características físicas y químicas, y el perfil de compuestos volátiles de cáscaras de naranja.	Secado por bandejas (TD) a 50 °C y velocidad de aire constante de 1,8 m/s; secado infrarrojo al vacío (VID) a 500 W, 50 °C de temperatura y 877 mbar; secado por microondas (VMD) al vacío a 334 W y 877 mbar.	El contenido de humedad inicial fue de 72,94 ± 0,31 % b.h. El VMD mostró la mayor velocidad de secado y difusividad, reduciendo el tiempo a 20,67 min frente a 106 min (VID) y 300 min (TD). Además, conservó mejor la vitamina C, los polifenoles y los carotenoides. El TD presentó la mayor pérdida de color. Se identificaron 63 compuestos volátiles en las muestras secas. El VID preservó mejor estos compuestos, mientras que el TD fue el más destructivo en términos de perfil volátil.	Bozkir et al., (2021)
Evaluar el impacto de los métodos de secado MVD, HAD y VFD en la cinética de secado, el contenido de compuestos bioactivos y la	Secado por microondas asistido por vacío (MVD) a 500, 600, 700 y 800 W y secado por aire caliente (HAD) a 60 °C	La potencia de microondas tuvo un efecto significativo en la velocidad de secado de la cáscara de los cítricos, a mayor potencia utilizada, mayor velocidad de secado. La cáscara secada por MVD	Shu et al., (2020)

capacidad antioxidante cáscaras de cítricos (<i>Citrus reticulata</i> Blanco)		presentó estructuras porosas, mejor capacidad de rehidratación, mayor contenido de compuestos fenólicos y flavonoides, y mayor actividad antioxidante que la secada por HAD. El método MVD obtuvo cáscaras con mejores propiedades físicas, químicas y antioxidantes	
Evaluar el efecto del secado por impacto de aire a diferentes temperaturas sobre las cinéticas de secado y los atributos de calidad de la cáscara de naranja.	Secado por impacto de aire a distintas temperaturas (50, 55, 60, 65 y 70 °C)	El incremento de la temperatura de secado redujo el tiempo requerido para el proceso. El modelo de Weibull presentó el mejor ajuste a las cinéticas experimentales. El contenido de polifenoles totales, flavonoides, ácido ascórbico y la capacidad antioxidante disminuyeron después del secado. Los flavonoides totales y el color no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las temperaturas evaluadas. La capacidad de retención de agua se redujo con el aumento de la temperatura.	Deng et al., (2020)
Evaluar el efecto de diferentes técnicas de secado (bandeja, vacío y liofilización) sobre la composición química, el color y la actividad antioxidante de la cáscara de kinnow.	Secado en bandeja a 60 °C; secado al vacío a 500 mmHg y liofilización a -50 °C	La liofilización seguida del secado al vacío preserva con mayor eficacia los componentes polifenólicos termosensibles y el color de la cáscara de kinnow. El rendimiento de extracción de fitoquímicos (g cáscara/100 g m.s) fue más alto en las muestras liofilizadas (22,04), y más bajo en el secado en bandeja (14,95), mientras que la muestra fresca presentó un valor de 5,19 g cáscara/100 g m.s)	Rafiq et al., (2019)

Evaluar el efecto de distintos métodos de secado (solar, aire caliente, liofilización, vacío e infrarrojo de onda media y corta) en la conservación de compuestos funcionales y la capacidad antioxidante de las cáscaras de mandarina.	Secado solar (SD) a 15–20 °C durante 7 h con HR de 30–40 %; liofilización (FD) a -30 °C y 10⁻³ MPa; secado por aire caliente (HAD) a 60–90 °C y velocidad de aire de 2,1 m/s; secado al vacío (VD) a 60–90 °C y presión de 3×10⁻³ MPa; y secado por infrarrojos de onda media y corta (IRD) a 60–90 °C, 1350 W y 2,1 m/s	FD e IRD retuvieron mayores niveles de sólidos solubles, azúcares reductores y totales, fibra cruda y acidez titulable en cáscaras de mandarina. El aumento de temperatura incrementó ligeramente los fenólicos totales en IRD, HAD y VD. FD, HAD e IRD mostraron mayor retención de flavonoides totales a temperaturas <80 °C	Xu et al., (2017)
Evaluar el impacto de distintos niveles de potencia de microondas en las propiedades fisicoquímicas y tecnológicas de las cáscaras de cítricos (Thompson Navel, mandarina y limón).	Secado por microondas a diferentes potencias: 100, 180, 300, 450 y 600W	El tiempo de secado por microondas depende de la potencia y del tipo de cítrico utilizado. El secado por microondas no presentó un efecto significativo sobre los parámetros de color (L*, a*, b*, C y E), contenido de carotenoides y flavonoides en las cáscaras de naranja y mandarina, sin embargo, si afectó el color de las cáscaras de limón. Las potencias de 450 y 600W fueron las que mejor conservaron el contenido total de fenoles en las cáscaras de limón y mandarina, mientras que en las cáscaras de naranja Navel Thompson, el contenido de fenoles aumentó con estas mismas potencias	Ghanem et al., (2012)

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cítricos son uno de los cultivos frutales más importantes del mundo, con una producción anual de aproximadamente 102 millones de toneladas. Estas frutas son originarias de las zonas tropicales y subtropicales del Sureste Asiático, el noreste de la India, el Sur de China, y el Archipiélago Malayo. La mandarina es una especie subtropical de clima templado perteneciente a la familia Rutaceae y al género *Citrus* L., es un fruto globoso, sabor dulce, corteza granulada y de tamaño pequeño (Ordoñez et al., 2020). Sin embargo, el procesamiento de los cítricos genera subproductos, siendo el epicarpio el más notable, llegando a alcanzar hasta el 50% del peso original de la fruta (Ordoñez et al., 2020). Estos subproductos representan un problema importante en el ámbito de la industria alimentaria, ya que cada año se generan alrededor de 10 millones de toneladas de residuos en todo el mundo, principalmente semillas, pulpa y cáscaras (Dubey et al., 2023).

Las cáscaras de cítricos desechadas, como las de la mandarina, contienen una diversidad de productos secundarios con actividad antioxidante, constituyendo una valiosa fuente de compuestos fenólicos (Ordoñez et al., 2018). No obstante, la incorporación de compuestos bioactivos presentes en residuos agroindustriales, como la cáscara de mandarina, en productos alimentarios requieren acondicionamiento previo. En este contexto, el secado no solo representa una estrategia de estabilización, sino también una etapa fundamental de acondicionamiento, que permite reducir la humedad del material y adecuarlo para su posterior aprovechamiento, aunque este proceso puede influir en sus propiedades funcionales (Abou et al., 2017).

Para el secado de la cáscara de mandarina, se han empleado diversos métodos, como el secado solar, el secado con aire caliente, secado al vacío, secado asistido por microondas y el secado por medio de infrarrojo. Aunque el secado solar se destaca por el bajo costo y operaciones simples, requiere de tiempos largos de proceso (Xu et al., 2017), y está sujeto a las condiciones climáticas. El secado con aire caliente es de los más utilizados industrialmente debido al bajo costo y tecnología simple, este método requiere de temperaturas elevadas y largos tiempos de operación, comprometiendo en la calidad del producto final (Rivera et al., 2019). La evaluación de métodos de secado aplicados a la cáscara de mandarina permite establecer condiciones que preserven las propiedades fisicoquímicas y funcionales del material, y optimicen la eficiencia del proceso. Este análisis es fundamental para el desarrollo de estrategias de valorización con aplicación en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética.

4.1. Pregunta de investigación

¿Cuál método de secado y temperatura de proceso permite obtener el menor tiempo de secado con mayor retención de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la cáscara de mandarina?

5. JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento de residuos agroindustriales generados en la postcosecha y en los procesos de transformación de mandarina representa una estrategia relevante dentro de la ingeniería de alimentos para mejorar la eficiencia del sistema productivo y reducir el impacto ambiental asociado a su disposición. En Colombia, el cultivo de mandarina es significativo, con una producción estimada de aproximadamente 109768 toneladas en 2010 (Aguilar Niño et al., 2012) y 348453 toneladas en 2018 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Las cáscaras, principal subproducto de este proceso, contienen compuestos bioactivos de alto interés industrial, como compuestos fenólicos, flavonoides y fibra dietaria. Su valorización mediante tecnologías de vanguardia no solo permite mejorar la eficiencia del proceso productivo y agregar valor a los residuos, sino que también facilita su incorporación en alimentos funcionales y su aprovechamiento como insumo en las industrias farmacéutica y cosmética.

La presente investigación surge de la necesidad de ofrecer una alternativa para el aprovechamiento de los residuos generados por la industria alimentaria, en particular los provenientes de las cáscaras de mandarina. Dado el volumen significativo de producción de frutos cítricos a nivel mundial, con especial énfasis en las mandarinas, cuyas cáscaras representan cerca de 50 % de estos subproductos, es necesario encontrar formas efectivas de manejo de este excedente y evitar su disposición inadecuada, para evitar contribuir la contaminación ambiental.

Las cáscaras de mandarina son ricas en fibra dietética y compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, flavonoides, por lo que, es esencial conservar estas características fisicoquímicas durante el proceso de secado (Gutiérrez & Pascual, 2016). Por lo tanto, esta propuesta plantea la aplicación del secado por ventana de refractancia como alternativa tecnológica al secado convencional, con el objetivo de maximizar la retención de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la cáscara de mandarina, mediante un proceso con menor tiempo de operación. Esta técnica integra simultáneamente los mecanismos de conducción, convección y radiación, lo que le confiere ventajas en eficiencia térmica y calidad del producto frente a métodos tradicionales (Ocoro & Ayala, 2012). Esta investigación aporta al desarrollo de tecnologías como el de ventana de refractancia que para objeto de este estudio se realizó a 50, 60 y 70 °C, para muestras de 3 × 1,5 cm y un espesor aproximado de 0,3 cm, para el acondicionamiento de residuos agroindustriales y fortalece líneas de valorización de subproductos derivados del procesamiento de mandarina, con aplicación potencial en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (Peñaranda et al., 2017).

6. HIPÓTESIS

El método de secado por ventana de refractancia permite obtener mayor retención de la calidad fisicoquímica y funcional en la cáscara de mandarina con menor tiempo de proceso, en comparación con los métodos de secado con aire caliente y solar.

7. OBJETIVOS

7.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de los métodos de secado solar, convectivo con aire caliente y por ventana de refractancia sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la cáscara de mandarina (*Citrus reticulata*).

7.2. Objetivos específicos

- Determinar y comparar las cinéticas de secado de la cáscara de mandarina mediante los métodos de secado solar, secado convectivo con aire caliente y secado por ventana de refractancia.
- Analizar los cambios en las propiedades de color, actividad de agua (a_w), contenido de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de la cáscara de mandarina sometida a los tres métodos de secado.

8. MATERIALES Y METODOS

8.1. Materiales

Se utilizaron cáscaras de mandarina fresca (*Citrus reticulata*, variedad Arrayana), adquiridas en Mega Fruver, un mercado especializado de frutas y verduras ubicado en la ciudad de Cali, del departamento del Valle del Cauca. La selección de las frutas se realizó siguiendo los criterios de madurez establecidos por la NTC 4086, eligiendo únicamente aquellas con estado de color 1 (verde claro) según la escala de 0 a 6 que clasifica la coloración de la cáscara. Las mandarinas se lavaron y se secaron con una toalla absorbente para eliminar el exceso de agua. Posteriormente, se retiraron manualmente las cáscaras y se cortaron con un molde rectangular de 1,5 cm de ancho por 3 cm de largo.

Para los análisis fisicoquímicos se utilizaron los siguientes reactivos: metanol, reactivo de Folin-Ciocalteu, carbonato de sodio (Na_2CO_3), ácido galico, DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) y Trolox (Ácido-6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico).

8.2. Diseño de experimentos

Se emplearon diseños experimentales independientes para secado con aire caliente (SAC) y ventana de refractancia (VR). Las condiciones de la materia prima y las variables de respuesta fueron iguales para los 3 métodos de secado.

Para el secado solar (SS), no se empleó un diseño experimental, dado que el proceso se llevó a cabo bajo condiciones ambientales no controladas (temperatura promedio: 30 °C, humedad relativa: 55 %). Aunque no se evaluaron niveles de un factor ni se controlaron condiciones operativas, se aplicó el mismo protocolo de evaluación que en los otros métodos.

8.2.1. Diseño experimental para secado por aire caliente

Se empleó un diseño experimental unifactorial con 3 niveles de temperatura (50, 60 y 70 °C). Los experimentos y las variables de respuesta se realizaron por triplicado, para un total de 9 pruebas (Tabla 4).

Tabla 4. Diseño experimental para el secado por aire caliente.

Variable de proceso	Niveles	Variable de respuesta
Temperatura (°C)	50	Contenido de humedad (cinéticas de secado)
	60	Color
	70	Actividad de agua Compuestos fenólicos Capacidad antioxidante

8.2.2. Diseño experimental para secado por ventana de refractancia

Se empleó un diseño experimental unifactorial con 3 niveles de temperatura (50, 60 y 70 °C). Los experimentos y las variables de respuesta se realizaron por triplicado, para un total de 9 pruebas (Tabla 5).

Tabla 5. Diseño experimental para el secado por ventana de refractancia.

Variables de proceso	Niveles	Variables de respuesta
Temperatura (°C)	50	Contenido de humedad (cinéticas de secado)
	60	Color
	70	Actividad de agua Compuestos fenólicos Capacidad antioxidante

8.3. Métodos de secado

8.3.1. Secado solar (SS)

El SS se realizó en la estación experimental de biología dentro de las instalaciones de la Universidad del Valle. Se empleó como muestra experimental 50 ± 2 g de cáscaras de mandarina previamente preparada, las cuales se ubicaron en una mesa de concreto, dentro de este espacio (ver Figura 2) y se realizó un seguimiento del contenido de humedad a lo largo del tiempo mediante el pesaje periódico de las muestras. A partir de los datos, se construyeron las curvas de secado, graficando el contenido de humedad (g agua/g materia seca) en función del tiempo de proceso (h).

Durante el ensayo, se registraron la temperatura y la humedad relativa del ambiente.



Figura 2. Montaje del secado solar de las cáscaras de mandarina.

8.3.2. Secado convectivo por aire caliente SCA

Las cáscaras de mandarina se secaron en un secador convectivo con aire caliente (Figura 3) (Armfield, USA). El sistema consta de un túnel de secado con ventilador de flujo axial ubicado en la entrada, el cual impulsa el aire en dirección horizontal a lo largo del túnel. Posteriormente, se encuentra el elemento calefactor, encargado de elevar la temperatura del aire mediante resistencias eléctricas. La cámara de secado, equipada con una puerta de acceso transparente, contiene un bastidor con bandejas suspendidas desde la parte superior del equipo, donde se colocaron las muestras expuestas al flujo de aire caliente.



Figura 3. Secador convectivo con aire caliente (Armfield, USA).

Se emplearon tres temperaturas (50, 60 y 70 °C) con una velocidad de aire promedio de 1,5 m/s (medida con un anemómetro). Las muestras de cáscaras de mandarina se colocaron sobre la bandeja del secador y a diferentes tiempos de proceso se retiraron 3 muestras, a las cuales se les midió el contenido de humedad por pérdida de peso. A partir de los resultados, se construyeron las curvas de secado, graficando el contenido de humedad (g agua/g materia seca) en función del tiempo de proceso (min) para cada temperatura empleada.

8.3.3. Secado por ventana de refractancia VR

Se empleó un equipo de ventana de refractancia de laboratorio compuesto por una película de Mylar y un baño termostático de agua (Figura 4) (CEI-ROBOTS, Col). Se emplearon tres niveles de temperatura (50, 60 y 70 °C). Las muestras de cáscara de mandarina se colocaron sobre la película (Mylar) para el secado y se retiraron 3 muestras a diferentes tiempos de proceso y se midió el contenido de humedad. A partir de los resultados, se construyeron las curvas de secado, graficando el contenido de humedad (g agua/g materia seca) en función del tiempo de proceso (min) para cada temperatura empleada.



Figura 4. Ventana de refractancia de laboratorio (CEI-ROBOTS, Col).

8.3.4. Coeficiente de difusión, energía de activación y modelación matemática de las cinéticas del secado.

El coeficiente de difusión de las muestras se calculó a partir de la ley de difusión de Fick, representada en la ecuación (1) para una lámina finita (Corzo et al., 2011), utilizando la razón de humedad (MR) descrita en la ecuación (2), donde M_o es el contenido de humedad inicial, M_t el contenido de humedad a un tiempo t , y M_e el contenido de humedad en el equilibrio. Sin embargo, MR suele simplificarse según la ecuación (3), sin un cambio significativo en su valor (Michalska et al., 2016).

Se desarrolló el primer término de la solución analítica ecuación (1) para una geometría de capa delgada, se empleó la ecuación (4) para calcular el coeficiente de difusión efectiva (D_{ef}) a partir del tiempo del proceso (t) y de la longitud característica de la muestra (L), de acuerdo con el método de secado (Bozkir et al., 2019).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 \frac{D_{ef}}{4L^2} t \right] \quad (1)$$

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (3)$$

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D_{ef}\pi^2}{4L^2} t \quad (4)$$

Realizando el cálculo de la pendiente por método gráfico, trazando $\ln(MR)$ en función del tiempo (t) de secado se obtiene la ecuación 6, para el cálculo de D_{ef} .

$$\text{Pendiente} = \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \quad (5)$$

La energía de activación se determinó utilizando la ecuación linealizada de Arrhenius, ecuación (6), mediante el cálculo de la pendiente por el método gráfico, trazando $\ln(D_{ef})$ en función del inverso de la temperatura ($1/T$) (Silva Paz et al., 2022).

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \left(\frac{E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \quad (6)$$

En donde D_{ef} es el coeficiente de difusión, R es la constante universal de los gases (8,314 J/(mol·K)), E_a es la energía de activación (kJ/mol), D_0 el factor de Arrhenius (m^2/s) y T la temperatura del proceso (K).

Además, los valores de humedad experimentales en el secado de cáscaras de mandarina se ajustaron por medio de cinco modelos de secado (Albuquerque et al., 2024; Ortiz et al., 2024). Los modelos y las ecuaciones utilizadas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Modelos de cinéticas de secado.

Nombre del modelo	Ecuación del modelo	No. ecuación
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(7)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(8)
Page modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	(9)
Henderson & Pabis	$MR = a \cdot \exp(-kt)$	(10)
Logarítmico	$MR = a \cdot \exp(-kt) + c$	(11)

*MR es la relación de contenido de humedad (adimensional); a (constante empírica), c (constante de corrección), n (parámetro empírico de ajuste), y k (constante de secado) son parámetros del modelo y t es el tiempo de secado (s)

La calidad de ajuste de los modelos propuestos para la cinética de secado se determinó por medio de los indicadores de ajuste: el error de suma cuadrada (SSE, ecuación 12), la raíz cuadrada del

error medio al cuadrado (RMSE, ecuación 13), el coeficiente de determinación (R^2 , ecuación 14), y el cuadrado medio del error (MSE, ecuación 15). Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) seguido de la prueba de Tukey ($p < 0,05$) sobre estos indicadores, con el fin de identificar diferencias significativas entre los modelos evaluados y seleccionar el de mejor ajuste. El análisis se llevó a cabo en el software Minitab® 17.

De acuerdo con Silva et al., (2022), como criterios para seleccionar el mejor ajuste entre modelos se consideraron los valores más bajos de SSE y RMSE ($\approx 0,0$), así como los valores más altos del coeficiente de determinación R^2 ($\approx 1,0$).

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ME_{ei} - MR_{ci})^2 \quad (12)$$

$$RSMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{c,i} - MR_{e,i})^2} \quad (13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR - MR_{c,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{e,i} - MR_{c,i})^2} \quad (14)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_c - MR_{c,i})^2 \quad (15)$$

8.4. Análisis físicoquímicos

Se midieron en muestras frescas y secas de acuerdo con los diseños de experimentos. En los tres métodos de secado, el contenido de humedad se midió a distintos tiempos con intervalos regulares desde los 0 hasta los 390 min (para VR y SCA). En la primera hora y media (0–90 min), se tomaron datos cada 15 min. A partir de este tiempo las mediciones se realizaron en intervalos de 30 min hasta 240 min, posteriormente se tomaron mediciones a 315, 345, 375 y 390 min durante el proceso. Para SS se midió en los intervalos 0, 180, 360, 630, 900, 1230, 1470, 1620, 1860 y 2100 min. Las otras variables de respuesta como el color, la actividad de agua (a_w), componentes fenólicos y capacidad antioxidante se cuantificaron en las muestras de cáscaras frescas y secas con un contenido de humedad entre el 10 – 12 % (b.h).

8.4.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad de las muestras de cáscara de mandarina se determinó según el método gravimétrico 925.10 de la AOAC (1995), con modificaciones. Se pesaron entre 5 - 6 g de muestra en cajas Petri utilizando una balanza analítica (Precisa Gravimetrics AG, modelo 321LX, Suiza). Posteriormente las muestras se colocaron en un horno de convección (Thermo Scientific, USA) a

70 °C durante 24 horas. El porcentaje de humedad se determinó por diferencia de peso (Ecuación 16) (Vargas et al., 2019) y para reportar los valores en base seca (b.s) se utilizó la (Ecuación 17) (De Dios, 1996).

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) 100 \quad (16)$$

Donde P_i , es el peso inicial de las cáscaras frescas y P_f es el peso final de las cáscaras secas.

$$H_s = \frac{H_h}{100 - H_h} \quad (17)$$

Donde H_h es la humedad en base húmeda y H_s es la humedad en base seca.

Finalmente, se registraron las pérdidas de masa de las muestras en intervalos de tiempo definidos durante el proceso de secado. Con la información, se construyeron las cinéticas de secado, representando el contenido de humedad en base seca (b.s.) en función del tiempo de secado (Alva et al., 2025).

8.4.2. Cambio de color

La medición del cambio en el color se realizó según la escala de color de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIELab) y los parámetros de color (luminosidad (L^*), el enrojecimiento (a^*) y el color amarillo (b^*)), con un colorímetro modelo CR-400 (Konica minolta, China) (Wang et al., 2023). A partir de las coordenadas L^* , a^* y b^* se calculó la variación del color total (ΔE) en cada tratamiento (ecuación 18).

$$\Delta E = \sqrt{(L_t^* - L_o^*)^2 + (a_t^* - a_o^*)^2 + (b_t^* - b_o^*)^2} \quad (18)$$

Donde L_o^* , a_o^* , b_o^* son los parámetros de las muestras frescas; y L^* , a^* , b^* son los parámetros en un tiempo t durante el secado.

8.4.3. Actividad de agua (a_w)

La a_w de las muestras cáscara frescas y secas se midieron con un higrómetro de punto de rocío (Decagon devices, AquaLab 4TE, USA) con una sensibilidad de 0,001 (Suri et al., 2024).

8.4.4. Compuestos fenólicos totales (CFT)

Los compuestos fenólicos totales de la cáscara de mandarina se determinaron mediante el método de Folin-Ciocalteu, siguiendo la metodología, descrita por Suri et al., (2024) con algunas modificaciones. Inicialmente, se realizó la extracción de los compuestos bioactivos presentes en la muestra, con 250 mg de cáscara de mandarina molida y 5 mL de metanol. La mezcla se agitó durante un minuto en un agitador Vortexer (Heathrow Scientific) y, posteriormente, se sometió a un baño de agua ultrasónico (Elma Schmidbauer GmbH, Transsonic TI-H, Alemania) a 25°C durante 25 min a una frecuencia de 45 kHz. Luego, la mezcla fue centrifugada a 10 000 rpm

durante 10 min en una centrifuga (Unico, PowerSpin BX C880, USA) Se extrajo el sobrenadante, al cual se le cuantificó el contenido de compuestos fenólicos totales.

Para el análisis, se mezclaron 1560 µL de agua destilada, 40 µL de extracto y 100 µL del reactivo de Folin-Ciocalteu. Tras agitar la solución, se incorporaron 300 µL de una solución de carbonato de sodio (Na₂CO₃) al 20 % (p/v). La mezcla permaneció en oscuridad durante una hora y, finalmente, la absorbancia fue medida a 765 nm utilizando un espectrofotómetro (UNICO 2100, USA.), empleando metanol como blanco. El contenido de compuestos fenólicos se expresó en miligramos de equivalente de ácido gálico por gramo de materia seca (mg GAE/g m.s). Se determinó utilizando una curva de calibración estándar de ácido gálico, también medidas a 765 nm (Figura 15- Anexos).

8.4.5. Capacidad antioxidante (CA) y porcentaje de inhibición

La capacidad antioxidante de las cáscaras de mandarina fresca y seca se evaluó mediante la eliminación de radicales 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), siguiendo la metodología descrita por (Hossain et al., 2025), con algunas modificaciones. Se mezclaron 3,7 mL de la solución metanólica de radicales DPPH (100µM) con 0,3 mL de extracto de cáscara, se agitó durante un minuto en vortex y posteriormente la mezcla se incubó en completa oscuridad durante 30 minutos a temperatura ambiente. Finalmente, se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un espectrofotómetro (UNICO 2100, USA), empleando metanol como blanco.

La capacidad antioxidante, se expresó en µmol equivalente de trolox por gramo de materia seca (µmol TE/g m.s), utilizando una curva de calibración estándar de Trolox, también medida a 517 nm (Figura 16 - Anexos). El porcentaje de inhibición de actividad de eliminación de radicales se calculó a partir de la absorbancia de las muestras y la muestra control (blanco), compuesta por 3,7 mL de solución de DPPH (100µM) y 0,3 mL de metanol, sin extracto. (ecuación 17) (Suri et al., 2024).

$$\% \text{ Inhibición} = \frac{A_c - A_s}{A_c} * 100 \quad (19)$$

Donde A_c es la absorbancia del control y A_s es la absorbancia del extracto de la muestra.

8.5. Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software Minitab® 17, con un nivel de confianza del 95%. Para identificar diferencias significativas entre tratamientos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey. Posteriormente, se empleó la prueba *t* de Student para comparar el mejor tratamiento de cada método de secado y determinar si se presentaban diferencias significativas.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Contenido de humedad (cinéticas de secado)

En las Figura 5, 6 y 7 se presentan las curvas de secado de cáscara de mandarina por los métodos solar (SS), secado convectivo con aire caliente (SCA) y ventana de refractancia (VR).

Para el SS, se registró una temperatura promedio de 30 °C y una humedad relativa del 55 %. En los métodos de SCA y VR, se evaluaron las temperaturas 50, 60 y 70 °C. El contenido promedio de humedad inicial de las cáscaras de mandarina fue de $73,81 \pm 1,88$ % (b.h.), lo cual concuerda con lo reportado por Kumar et al., (2020) y Mohamed et al., (2024), quienes encontraron valores de $76,84 \pm 1,536$ % y $73,47 \pm 0,49$ % (b.h) respectivamente para cáscara de mandarina. En SCA y VR, se observó que la humedad disminuyó al aumentar la temperatura para un mismo tiempo de secado. Esta reducción en el tiempo de secado se puede atribuir, al aumento continuo de la presión de vapor de agua dentro de las muestras de cáscara, lo que favorece una mayor migración de humedad (Kumar Mahawar et al., 2017). Asimismo, Xu et al., (2017) manifiestan que el aumento en la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el producto acelera la velocidad de difusión del agua, influyendo en la eficiencia del secado.

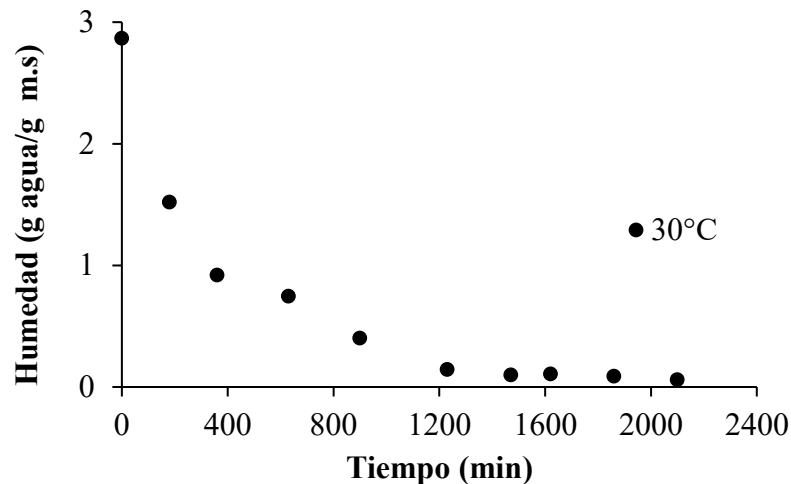


Figura 5. Curva de secado de cáscara de mandarina por el método SS (30 °C y 55 % HR).

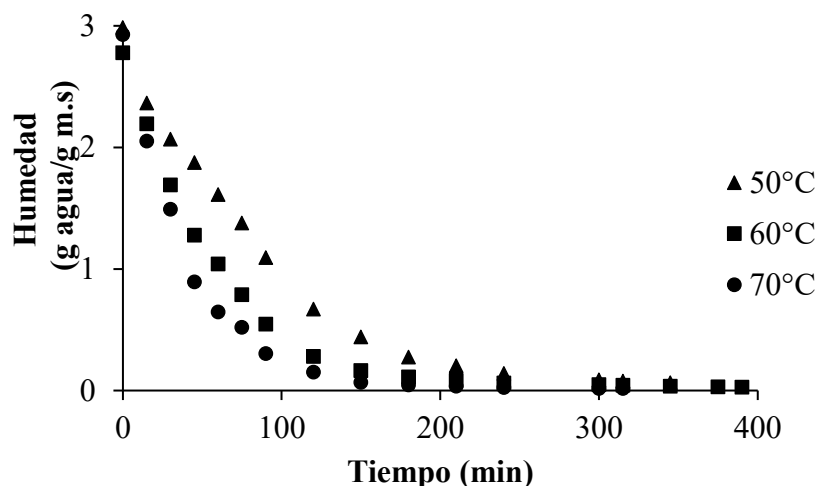


Figura 6. Curvas de secado de cáscaras de mandarina por el método de SCA a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C).

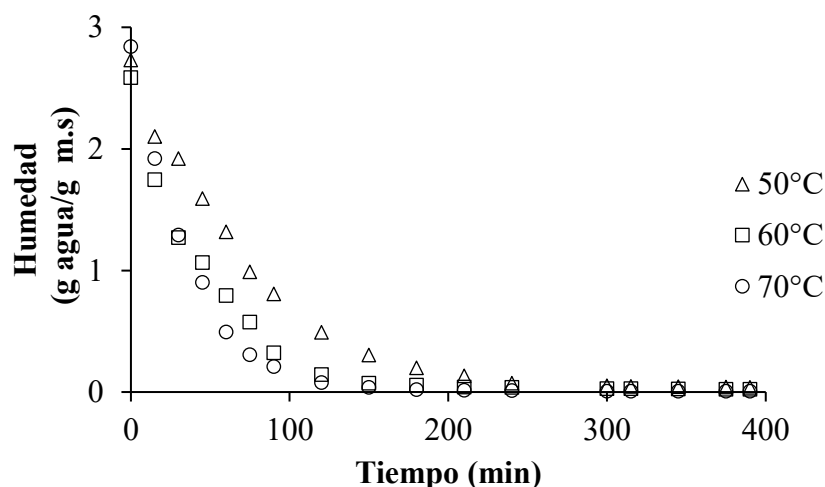


Figura 7. Curvas de secado de cáscaras de mandarina por el método de VR a diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C).

Al comparar las curvas de secado (Figuras 8, 9 y 10) por los métodos de SCA y VR se evidencia que el secado por VR presentó mayor eficiencia en el secado al obtener menores tiempos para alcanzar un mismo nivel de humedad en cáscaras de mandarina en comparación con el secado por aire caliente (SCA). Para obtener un contenido de humedad del $11 \pm 1 \%$ (b.h.), se observó que a 50 °C los tiempos requeridos para VR y SCA fueron respectivamente de 215 y 260 min; a 60 °C de 128 y 172 minutos; y a 70 °C, de 105 y 130 minutos. Resultados similares han sido reportados por Abul y Ghanem (2011) y Herman y Lara et al. (2020), quienes también evidenciaron mayor eficiencia del secado por VR en matrices de tomate y rábano frente al método SCA. En el caso del secado solar (Figura 5), se registró un tiempo de 1336 min para alcanzar el mismo contenido de humedad, lo cual se asocia a la baja temperatura operativa y a la alta variabilidad de las condiciones ambientales, particularmente en la radiación solar y la humedad relativa del aire (Xu et al., 2017).

La eficiencia del secado por VR se debe a la combinación de mecanismos de transferencia térmica que actúan simultáneamente. El calor se transfiere por conducción desde la lámina plástica caliente al alimento, y por radiación infrarroja a través de la lámina hacia la superficie húmeda de la muestra. Esta radiación favorece una evaporación rápida del agua superficial. A medida que la humedad disminuye, el secado continúa principalmente por conducción térmica desde la base hacia el interior del alimento. A diferencia del secado por aire caliente, donde el calor se transfiere por convección desde el aire; en la VR no hay movimiento de fluido alrededor de la muestra, lo que reduce el tiempo de proceso y mejora la eficiencia térmica (Mahanti et al., 2021; Zotarelli et al., 2015).

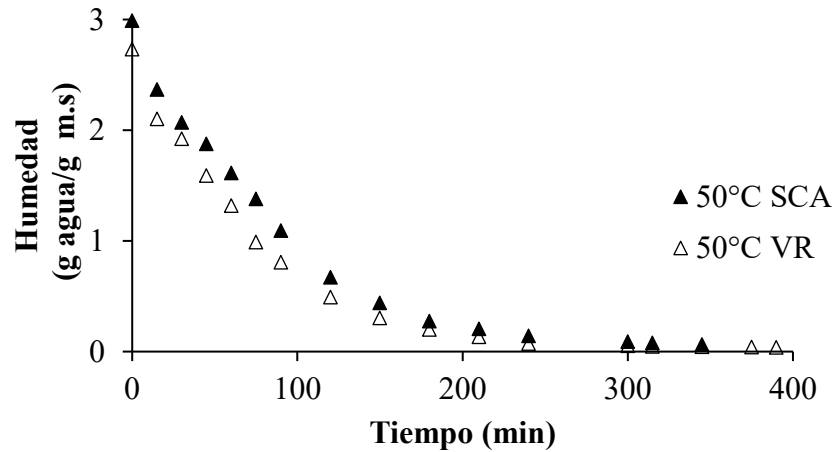


Figura 8. Comparación de curvas de secado de cáscaras de mandarina a 50 °C.

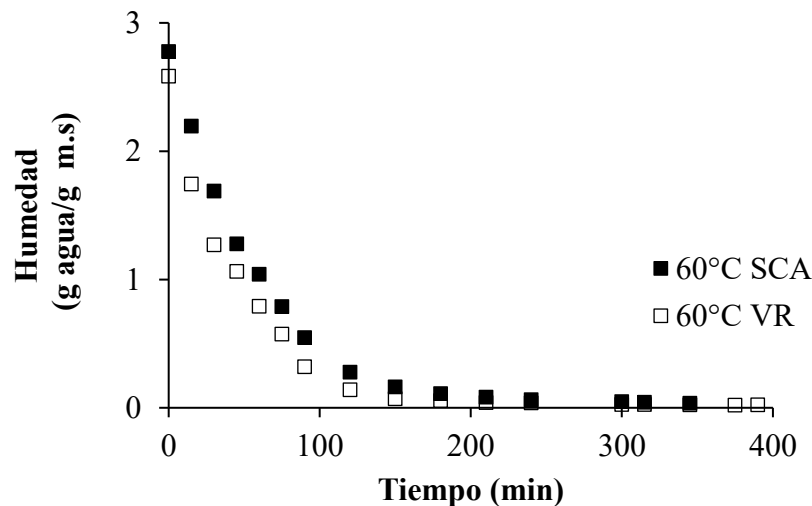


Figura 9. Comparación de curvas de secado de cáscaras de mandarina a 60 °C.

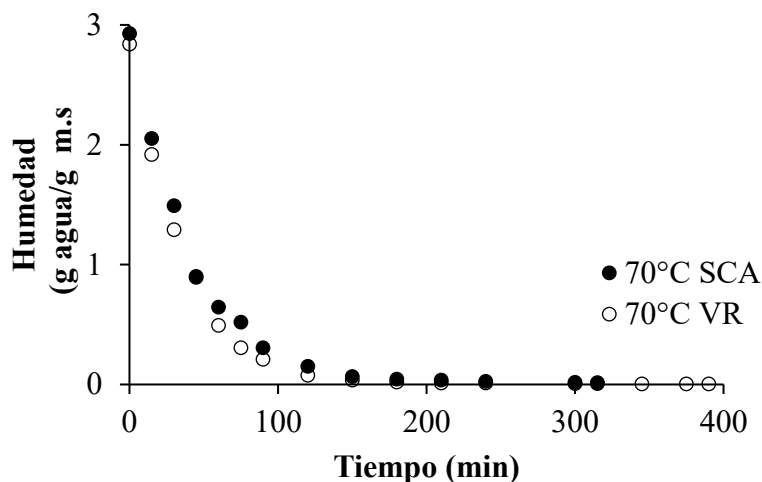


Figura 10. Comparación de curvas de secado de cáscaras de mandarina a 70 °C.

9.1.1. Coeficientes de difusión

En Tabla 7 se presentan los valores promedio de los coeficientes de difusión (D_{ef}) para SS, SCA y VR. Para SS se encontró un valor de $7,7202 \pm 0,0112 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que para SCA variaron entre $5,1423 \pm 0,0179 \times 10^{-10}$ y $7,2304 \pm 0,0537 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ y para VR variaron entre $5,8081 \pm 0,0895 \times 10^{-10}$ y $8,5111 \pm 0,0358 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Estos valores se encuentran dentro del rango reportado por Panagiotou et al., (2004) quien realizó estudios bibliográficos sobre la difusividad en productos alimentarios, encontrando que el 95 % de las matrices alimentarias se encuentran en un rango de 1×10^{-1} y $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Además, los coeficientes de difusión obtenidos son comparables con los reportados por Suri et al., (2024) para muestras de cáscara de mandarina Kinnow secadas mediante un secador infrarrojo a temperaturas de 50, 60 y 70°C, en el cual se encontraron valores de difusividad en un rango de $6,72 \times 10^{-10}$ y $1,41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente. También son similares con los reportados por Doymaz, (2011) para papa dulce secadas entre 50 y 70°C en un secador de gabinete, con valores entre $9,32 \times 10^{-11}$ y $1,76 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. También Xiao et al., (2010) reportó para cubos de zanahoria secados en un secador de aire entre 40 y 60 °C valores entre $2,65 \times 10^{-10}$ y $10,52 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Se evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) en los valores de difusividad efectiva (D_{ef}) entre las tres temperaturas; lo que indica que la temperatura influye directamente sobre este parámetro. A medida que la temperatura aumenta, se incrementan los valores de difusividad, debido al aumento en la energía térmica, que intensifica la actividad molecular del agua y facilita su movimiento dentro del alimento (Doymaz, 2011). Este comportamiento ha sido reportado previamente por diversos autores, como Hssaini et al., (2021), Ozcan-Sinir et al. (2019) y Sehrawat et al. (2018), en estudios realizados con higos, kumquat y mango respectivamente.

Tabla 7. Coeficientes de difusión.

Método de secado	Temperatura (°C)	Def (m ² /s)
SS	30	7,7202 ± 0,0112E-11
	50	5,1423 ± 0,0179 E-10 ^A
SCA	60	5,8967 ± 0,0716 E-10 ^B
	70	7,2304 ± 0,0537 E-10 ^C
VR	50	5,8081 ± 0,0895 E-10 ^D
	60	6,5186 ± 0,0537 E-10 ^E
	70	8,5111 ± 0,0358 E-10 ^F

Letras (A-F) diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento (p<0,05).

9.1.2. Energía de activación *Ea*

En la Tabla 8, se presentan los valores de *Ea* para las cáscaras de mandarina deshidratadas en SCA y VR, las cuales se obtuvieron a través de la linealización de la ecuación de Arrhenius. Los resultados muestran que el método de SCA presentó un valor de 17,075 ± 0,860 kJ/mol, mientras que el método de VR presentó un valor de 12,901 ± 0,322 kJ/mol. Estos valores no presentaron diferencias significativas (p>0,05). Estos valores se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para materiales alimentarios, el cual oscila entre 12 y 110 kJ/mol (Arulkumar et al., 2023). Además, son similares con los reportados por Chokngamvong & Suvanjumrat, (2023) para rodajas de piña deshidratadas en un secador de flujo cruzado, quienes encontraron energías de activación en el rango de 16,29 a 21,95 kJ/mol.

De acuerdo con estos resultados el secado por VR al obtener menor valor de la *Ea*, indica que requiere menor energía para iniciar la transferencia de agua del interior a la superficie de las muestras durante el proceso de secado.

Tabla 8. Energía de activación para cada método de secado.

Método	Ea (kJ/mol)
SS	-
SCA	17,075 ± 0,860 ^A
VR	12,901 ± 1,322 ^A

Letras diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento (p<0,05).

9.1.3. Modelos cinéticos de secado

Los modelos matemáticos usualmente utilizados para describir la cinética de los productos de origen agrícola pueden ser clasificados en tres categorías, teóricos, semiteórico y empíricos. Para este caso con referencia a la cáscara de mandarina se trabajó con modelos semiteóricos los cuales derivan de la simplificación de la solución de series generales de la ley de Fick. (Perea-Flores et al., 2012) y los cuales describen la cinética de secado experimental.

En la Tabla 9, se presentan los parámetros correspondientes al modelamiento matemático de las cinéticas de secado de cáscara de mandarina mediante los métodos de secado SS, SCA y VR. Se evaluaron distintos modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de la cáscara frente a cada tratamiento, seleccionando aquellos con mejor ajuste según los criterios establecidos. De esta manera, para SSE y RSMSE las letras de agrupamiento E y D representan el valor más cercano a 0; para R^2 la letra A corresponde al valor más cercano a 1.

Tabla 9. Parámetros cinéticos estimados por distintos modelos matemáticos en cáscara de mandarina.

Modelo	Parámetro	SS	SCA			VR		
			50°C	60°C	70°C	50°C	60°C	70°C
Newton	K	0,00005	0,00019	0,00029	0,00041	0,00022	0,00036	0,00045
	SSE	0,02131 ^A	0,01036 ^A	0,00272 ^A	0,00229 ^A	0,00773 ^A	0,00751 ^A	0,00211 ^A
	RSMSE	0,14599 ^A	0,10180 ^A	0,05212 ^A	0,04789 ^A	0,08793 ^A	0,08664 ^A	0,04591 ^A
	R ²	0,97901 ^E	0,99278 ^D	0,99820 ^E	0,99813 ^E	0,99517 ^E	0,99466 ^E	0,99838 ^E
	MSE	0,00237	0,00074	0,00017	0,00018	0,00048	0,00047	0,00013
	SST	1,01527	1,43633	1,50756	1,22744	1,59917	1,40447	1,29932
Page	K	0,00075	0,00012	0,00017	0,00032	0,00014	0,00064	0,00025
	N	0,72626	1,05183	1,05990	1,02880	1,05889	0,92956	1,07770
	SSE	0,00503 ^E	0,00946 ^D	0,00186 ^E	0,00214 ^E	0,00671 ^E	0,00630 ^E	0,00109 ^E
	RSMSE	0,07090 ^E	0,09727 ^D	0,04313 ^E	0,04622 ^E	0,08192 ^E	0,07939 ^E	0,03306 ^E
	R ²	0,99427 ^B	0,99368 ^B	0,99880 ^A	0,99828 ^B	0,99596 ^B	0,99535 ^A	0,99915 ^B
	MSE	0,00072	0,00079	0,00013	0,00019	0,00048	0,00045	0,00008
Page modificado	SST	0,87724	1,49605	1,55580	1,24379	1,66160	1,35667	1,27925
	K	0,00005	0,00019	0,00028	0,00040	0,00022	0,00036	0,00045
	N	0,72626	1,05183	1,05990	1,02880	1,05889	0,92956	1,07770
	SSE	0,00503 ^D	0,00946 ^C	0,00186 ^D	0,00214 ^D	0,00671 ^D	0,00630 ^D	0,00109 ^D
	RSMSE	0,07090 ^D	0,09727 ^C	0,04313 ^D	0,04622 ^D	0,08192 ^D	0,07939 ^D	0,03306 ^D
	R ²	0,99427 ^A	0,99368 ^A	0,99880 ^B	0,99828 ^A	0,99596 ^A	0,99535 ^B	0,99918 ^A

Henderson & Pabis	MSE	0,00072	0,00079	0,00013	0,00019	0,00048	0,00045	0,00008
	SST	0,87725	1,49605	1,55580	1,24379	1,66161	1,35667	1,33628
	K	0,00004	0,00019	0,00029	0,00041	0,00022	0,00035	0,00046
	A	0,95617	0,99573	1,01258	1,00581	1,00123	0,97793	1,00978
	SSE	0,01926 ^B	0,01033 ^B	0,00248 ^B	0,00225 ^B	0,00773 ^B	0,00685 ^B	0,00199 ^B
	RSMSE	0,13876 ^B	0,10163 ^B	0,04980 ^B	0,04744 ^B	0,08791 ^B	0,08278 ^B	0,04460 ^B
	R²	0,97939 ^D	0,99275 ^E	0,99839 ^D	0,99819 ^D	0,99518 ^D	0,99494 ^D	0,99849 ^D
	MSE	0,00241	0,00079	0,00017	0,00019	0,00052	0,00046	0,00013
	SST	0,93432	1,42387	1,53972	1,24005	1,60270	1,35361	1,32070
	K	0,00005	0,00018	0,00029	0,00041	0,00022	0,00036	0,00046
	A	0,93479	1,00988	1,00944	1,00348	1,00430	0,97464	1,01098
	C	0,03894	-0,02142	0,00487	0,00339	-0,00497	0,00505	-0,00165
	SSE	0,01380 ^C	0,00924 ^E	0,00232 ^C	0,00219 ^C	0,00761 ^C	0,00665 ^C	0,00196 ^C
	RSMSE	0,11745 ^C	0,09615 ^E	0,04816 ^C	0,04675 ^C	0,08721 ^C	0,08156 ^C	0,04432 ^C
	R²	0,98424 ^C	0,99367 ^C	0,99848 ^C	0,99823 ^C	0,99530 ^C	0,99503 ^C	0,99852 ^C
Logarítmico	MSE	0,00197	0,00077	0,00017	0,00020	0,00054	0,00048	0,00014
	SST	0,87536	1,46067	1,52420	1,23156	1,61659	1,33797	1,32588

Letras diferentes (A-E) dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento ($p < 0,05$).

El comportamiento de todos los modelos evaluados presentó un buen ajuste frente a la cinética de secado, sin embargo, teniendo en cuenta los criterios de selección del modelo y el análisis ANOVA, se encontraron diferencias significativas entre modelos teniendo en cuenta los parámetros SSE, RSMSE y R^2 . En la Tabla 9 se encuentran los resultados de estas diferencias con base a los resultados comparativos para los diferentes modelos evaluados mediante la prueba de tukey. Se evidencia que el modelo de Page Modificado presenta el mejor ajuste global, teniendo valores muy cercanos a 0 con respecto a SSE y RSMSE y valores muy cercanos a 1 para el R^2 , sin embargo, el modelo de Page también presenta un buen ajuste. El comportamiento fue especialmente sobresaliente en tratamiento de VR a 70°C, donde el modelo alcanzó su mejor rendimiento (SSE = 0,00109, RSMSE = 0,03306, R^2 = 0,99918), lo cual indica la capacidad de este modelo para describir el comportamiento de secado para la cáscara de mandarina en todos los tratamientos.

El valor del parámetro k aumentó con el incremento de la temperatura en los tratamientos de VR y SCA, lo que evidencia la dependencia con la temperatura. Este comportamiento sugiere que k está relacionado con la pérdida de agua en la muestra durante el secado, por lo que puede considerarse un parámetro pseudo-difusivo, es decir, un valor que refleja indirectamente la tasa de

difusión de la humedad sin corresponder exactamente a un coeficiente de difusión físico (González et al., 2022). Las curvas de secado modeladas mediante la ecuación de Page modificado para SS, SCA y VR se presentan en las Figuras 11, 12 y 13 respectivamente. Se evidencia gráficamente como se ajusta la curva que representa al modelo al comportamiento de los datos de las cinéticas obtenidas experimentalmente a lo largo del tiempo. Este alto grado de concordancia permite identificar la rápida caída desde el punto inicial de humedad, seguida por una fase de secado más lenta, lo que corresponde a las etapas típicas del proceso de deshidratación.

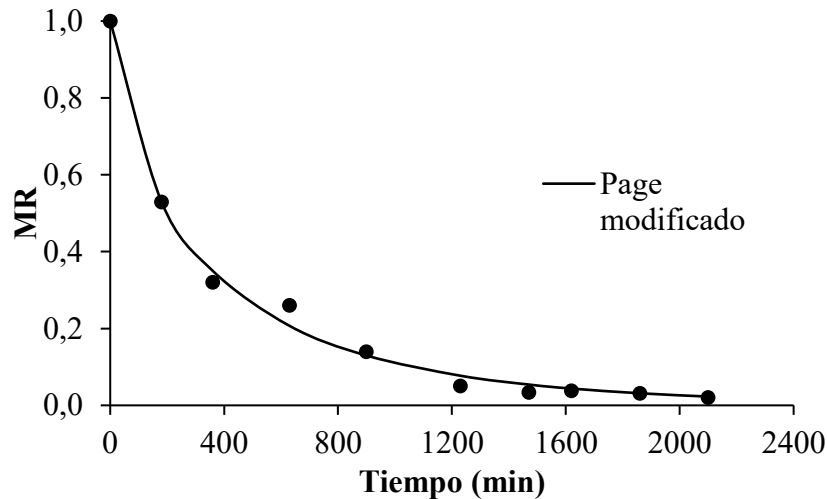


Figura 11. Curvas de secado por el modelo de Page modificado en SS.

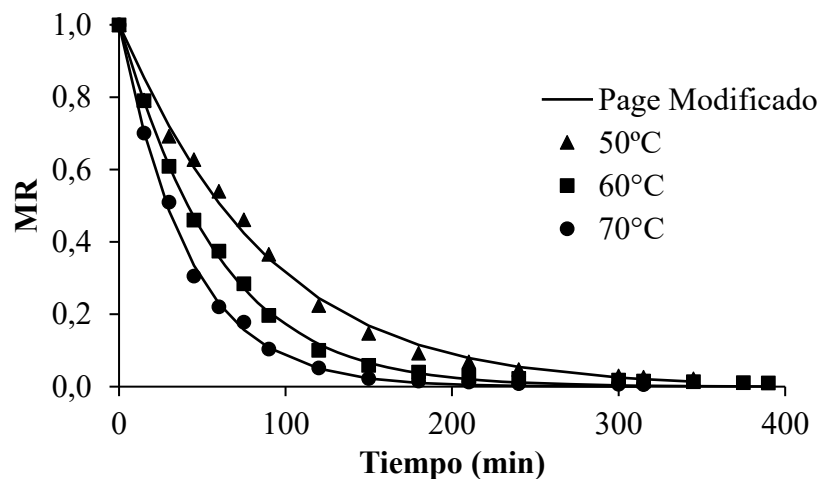


Figura 12. Curvas de secado por el modelo de Page modificado en SCA.

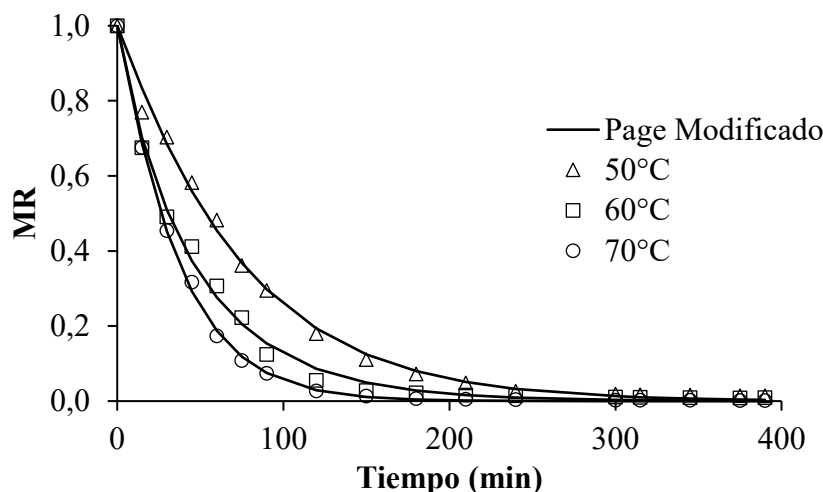


Figura 13. Curvas de secado por el modelo de Page modificado en VR.

Otros autores como Suri et al., (2024) y Sehrawat et al., (2018) recomendaron los modelos de page (page y page modificado) como un modelo para predecir el contenido de humedad de las cáscaras de mandarina de variedad kinnow y en rodajas de mango respectivamente.

9.2. Análisis fisicoquímicos

9.2.1. Cambio en el color

Se evaluaron los parámetros de color CIELab en las muestras de cáscara de mandarina, fresco y seco, considerando solo la cara externa de la cáscara. En las muestras frescas, se presentaron valores de L^*_0 : $35,523 \pm 1,118$; a^*_0 : $-11,360 \pm 0,483$ y b^*_0 : $18,428 \pm 1,287$.

En la Tabla 10 y 11 se presentan los valores obtenidos para los parámetros de color $L^*a^*b^*$ y el cambio de color ΔE en las cáscaras de mandarina secas, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$), en los parámetros L^* , a^* , b^* y en el cambio de color (ΔE) por efecto de la temperatura en ambos métodos de secado (SCA y VR). Esto indica que, en el secado de cáscaras de mandarina, la temperatura no influye directamente en el color de las muestras.

Los parámetros L^* y b^* si disminuyeron con respecto a los valores iniciales o muestra fresca, esto indica que las muestras deshidratadas se oscurecieron después del método de secado. Esto puede ser debido a la caramelización de azúcares solubles o la reacción de Maillard, que provoca el pardeamiento durante el secado (Izli et al., 2018). Con respecto al parámetro a^* se observó un aumento con respecto a las muestras frescas, indicando una leve pérdida el color verde característico de la mandarina. Este comportamiento de L^* , a^* y b^* es similar al reportado por Abou-Arab et al., (2017) en donde encontraron una reducción de los valores de L^* y b^* , y un aumento en los valores a^* en comparación con los valores de la muestra de control en muestras de polvo de cáscaras de mandarina secadas por los tres métodos de secado evaluados en el presente estudio.

Tabla 10. Parámetros L^* , a^* y b^* de cáscaras de mandarina secas a humedad 11% (b.h.) para los tres métodos de secado.

Método de secado	Temperatura (°C)	L^*	a^*	b^*
SS	30	$24,762 \pm 4,330$	$-6,589 \pm 1,754$	$15,833 \pm 2,809$
	50	$24,379 \pm 2,014^A$	$-8,269 \pm 1,111^B$	$15,919 \pm 2,462^C$
SCA	60	$23,959 \pm 2,080^A$	$-7,523 \pm 1,118^B$	$14,642 \pm 3,060^C$
	70	$26,491 \pm 2,340^A$	$-8,511 \pm 0,920^B$	$16,399 \pm 2,133^C$
VR	50	$24,626 \pm 1,425^E$	$-7,843 \pm 1,065^H$	$14,676 \pm 1,943^F$
	60	$24,761 \pm 2,194^E$	$-7,909 \pm 1,081^H$	$15,276 \pm 2,306^F$
	70	$25,571 \pm 1,087^E$	$-7,391 \pm 1,425^H$	$17,194 \pm 1,842^F$

Letras (A-H) diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento ($p < 0,05$).

Tabla 11. Cambio total de color (ΔE) de las cáscaras de mandarina secas 11% (b.h.) para los tres métodos de secado.

Método de secado	Temperatura (°C)	ΔE
SS	30	$11,963 \pm 5,149$
	50	$11,491 \pm 2,208^A$
SCA	60	$12,772 \pm 2,336^A$
	70	$13,053 \pm 2,795^A$
VR	50	$11,032 \pm 2,219^B$
	60	$11,282 \pm 1,946^B$
	70	$13,456 \pm 2,243^B$

Letras (A-B) diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento ($p < 0,05$).

9.2.2. Actividad de Agua (a_w)

Los valores de a_w obtenidos para cada tratamiento de secado de cáscaras de mandarina se encuentran en la Tabla 12. El valor inicial de la a_w para muestras frescas de cáscara de mandarina fue de $0,9826 \pm 0,003$. Se observaron diferencias entre los tratamientos en relación con la disminución de la actividad de agua durante el secado. Para un contenido de humedad cercano al 11 % (b.h.), los valores de a_w se encontraron entre 0,4 y 0,6, rangos que corresponden a productos

deshidratados. Estos valores indican que una proporción significativa del agua presente está ligada a los componentes de la matriz alimentaria, lo que limita su disponibilidad para reacciones bioquímicas o para el desarrollo microbiano. En consecuencia, a niveles de humedad entre 10 % y 12 % (b.h.), la cantidad de agua disponible no es suficiente para favorecer el crecimiento microbiano, lo que contribuye a la estabilidad microbiológica de las cáscaras de mandarina (Soledad Tapia, 2020).

Tabla 12. Actividad de agua de muestras de cáscaras de mandarina secadas a humedad del 11% (b.h.).

Método de secado	Temperatura (°C)	a_w
SS	30	$0,4665 \pm 0,0101$
	50	$0,5636 \pm 0,0241^A$
SCA	60	$0,5241 \pm 0,0084^B$
	70	$0,5538 \pm 0,0098^A$
VR	50	$0,5245 \pm 0,0311^A$
	60	$0,5377 \pm 0,0608^A$
	70	$0,5374 \pm 0,0274^A$

Letras (A-B) diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento ($p < 0,05$).

El tratamiento por secado solar (SS) mostró una a_w baja ($0,4665 \pm 0,01$). No obstante, este resultado se reporta únicamente como valor referencial, ya que el método no permite control de temperatura ni replicabilidad experimental, por lo cual no fue incluido en los análisis estadísticos comparativos.

En cuanto al método de secado convectivo por aire (SCA), el análisis ANOVA evidenció diferencias significativas entre las temperaturas evaluadas ($p < 0,05$). La prueba de Tukey indicó que la temperatura de 60 °C presentó una a_w significativamente menor (media = $0,5241 \pm 0,01$) frente a los tratamientos a 50 °C ($0,5636 \pm 0,02$) y 70 °C ($0,5538 \pm 0,01$), los cuales no mostraron diferencias entre sí. Esto indica que, dentro del método SCA, 60 °C fue la temperatura más eficaz para la reducción de a_w en cáscaras de mandarina.

Por otro lado, en el método de VR, el ANOVA no encontró diferencias significativas entre las temperaturas evaluadas ($p > 0,05$). La prueba de Tukey agrupó todos los tratamientos en un mismo grupo estadístico, indicando que la temperatura no presentó un efecto sobre la a_w bajo esta técnica. Se realizó la prueba de t-student para muestras independientes entre SCA a 60 °C y VR a 60 °C, dado a que SCA 60°C presentó diferencias significativas entre las demás temperaturas del mismo proceso y VR 60°C que no presentó diferencias entre sus temperaturas, como resultado se obtuvo que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ($p > 0,05$), esto podría

deberse a la alta variabilidad de la media que corresponde a VR a 60°C. Sin embargo, también se analizó con la prueba comparativa de t-student los datos obtenidos para SCA 60°C y VR 50°C dado a que presentaron las menores a_w dentro de sus respectivos métodos. El resultado mostró una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), aunque con una magnitud reducida ($\Delta = 0,00037$), lo que sugiere que el tratamiento SCA a 60 °C fue más efectivo que VR a 50 °C en la reducción de la a_w de las cáscaras de mandarina.

Estudios previos han reportado valores de a_w comparables a los obtenidos en este estudio. Suri et al., (2024) determinaron que la a_w de cáscaras frescas de mandarina kinnow fue de $0,83 \pm 0,01$, la cual disminuyó tras aplicar secado infrarrojo a 50, 60 y 70 °C, alcanzando valores entre 0,47 y 0,50. De manera similar, Kaur et al. (2024) reportaron que cáscaras de mandarina sometidas a secado solar con una humedad final entre 10 y 12 % presentaron una a_w inferior a 0,6. Al comparar estos valores con los obtenidos experimentalmente (Tabla 12), se observa que todas las muestras alcanzaron una a_w inferior a 0,57, lo que concuerda con lo reportado en la literatura para productos con bajo contenido de humedad. Las muestras secadas mediante el método solar (SS) presentaron el valor más bajo de a_w ($0,4665 \pm 0,01$), consistente con lo descrito por Kaur et al. (2024). Los tratamientos permanecieron por debajo del umbral crítico de 0,6, lo que garantiza una adecuada estabilidad microbiológica del producto.

9.2.3. *Compuestos fenólicos totales (CFT)*

El contenido de compuestos fenólicos totales (CFT) en las muestras secas de las cáscaras de mandarina se muestran la Tabla 13. El valor promedio de CFT para las muestras frescas fue de $13,539 \pm 2,439$ mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de materia seca (mg Eq AG/g m.s.). Este valor es inferior al reportado por otros autores, quienes han encontrado concentraciones de 22,24 mg GAE/g m.s. (Xu et al., 2017), 24,51 mg GAE/g m.s (Rafiq et al., 2019) y 31,05 mg GAE/g m.s. (Suri et al., 2024) utilizando metanol como solvente y extracción asistida por ultrasonido. Estas diferencias en los valores de CFT se relacionan con las diferencias en los cultivos y variedades, la ubicación geográfica, cosecha, estado de las muestras clasificadas según el estado poscosecha (verde o en madurez de consumo), determinado por criterios como el color de la cáscara y la firmeza del fruto y los métodos adoptados para la extracción (Esparza-Martínez et al., 2016; Inan, Ozcan, & Aljuhaimi, 2018).

El análisis estadístico, indicó que existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los niveles de temperatura para el método SCA. Para determinar los tratamientos con diferencias significativas en ambos métodos se realizó una prueba de Tukey. En el SCA, se evidenciaron diferencias significativas en los valores de CFT entre los tratamientos a 50 y 70 °C. En el secado por VR, se presentaron diferencias significativas entre los tres tratamientos evaluados.

El contenido de compuestos fenólicos disminuyó posterior a los tratamientos de secado. La reducción en las muestras secas se asoció a la descomposición química y/o enzimática de los ácidos fenólicos y flavonoides que se genera después del proceso de secado (Rafiq et al., 2019). Asimismo, la pérdida de CFT puede deberse a mecanismos enzimáticos como la acción de la polifenoloxidasas como a mecanismos no enzimáticos asociados al procesamiento de los residuos. Estos procesos suelen intensificarse durante el secado, afectando la estabilidad de los compuestos

fenólicos (Suri et al., 2024). Sin embargo, se puede observar también que con el aumento de la temperatura hay un aumento en el contenido fenólico total, este comportamiento también fue reportado por Xu et al., (2017), determinando que el incremento de la temperatura en distintos métodos de secado generó un aumento en el contenido total de compuestos fenólicos presentes en las cáscaras de mandarina. Este efecto podría deberse a que mayores temperaturas incrementan la velocidad de secado, reduciendo el tiempo de exposición al calor y, por ende, la degradación de estos compuestos bioactivos (Rahman et al., 2018).

Por otro lado, los valores de CFT obtenidos en las muestras secas fueron inferiores a los reportados por Babbar et al., (2011), quienes evaluaron el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante en extractos de seis residuos de frutas, incluida la cáscara de mandarina Kinnow. En dicho estudio, se registró un valor de $17,5 \pm 0,34$ mg GAE/g de materia seca para cáscaras secas a 60 °C, utilizando secado por aire caliente hasta alcanzar peso constante. Para la extracción, se emplearon 5 g de muestra con metanol acuoso al 70 %, durante 3 horas a 40 °C bajo condiciones de reflujo. Esta metodología difiere de la utilizada en el presente trabajo, en el cual se emplearon 0,25 g de muestra y metanol al 98 %, sin asistencia térmica. Asimismo, en su determinación colorimétrica mediante Folin-Ciocalteu, la etapa de incubación fue de 2 horas a temperatura ambiente, tras la dilución con carbonato de sodio y agua desionizada, lo que posiblemente favoreció una mayor extracción de compuestos fenólicos. Por lo tanto, estas diferencias en los valores obtenidos y los reportados en dicho estudio pueden atribuirse tanto a la metodología de extracción como a las características propias de la materia prima utilizada.

El tratamiento que presentó mayor retención de CFT en las muestras secas fue a 70 °C tanto en el método SCA ($10,4099 \pm 0,4732$ Eq mg AG/g m.s) como en el secado por VR ($10,2437 \pm 0,2597$ Eq mg AG/g m.s), este efecto se relaciona con la menor duración del secado a dicha temperatura, lo que limita la exposición térmica y reduce la degradación de los compuestos fenólicos; 130 y 105 minutos, respectivamente. El método que presentó menor retención de CFT ($5,9754 \pm 0,2366$ Eq mg AG/g m.s) fue el SS, esta pérdida de CFT se asoció al tiempo de secado (1336 minutos), lo que provoca una mayor degradación de los compuestos sensibles a la temperatura.

Tabla 13. Contenido de compuestos fenólicos totales en cáscaras de mandarina y seca (11 ± 1 % b.h.).

Método de secado	Temperatura (°C)	CFT (Eq mg AG/g materia seca)
SS	30	$5,975 \pm 0,237$
	50	$9,553 \pm 1,019^A$
	60	$9,762 \pm 0,551^{AB}$
	70	$10,410 \pm 0,473^B$
VR	50	$7,816 \pm 0,231^A$
	60	$8,318 \pm 0,457^B$
	70	$10,244 \pm 0,260^C$

Letras diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento ($p < 0,05$).

9.2.4. Porcentaje de inhibición y capacidad antioxidante (CA).

La capacidad antioxidante de las muestras de cáscara de mandarina fue evaluada mediante el método del radical 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH), expresada como porcentaje de inhibición

y μmol equivalentes de Trolox en gramos de materia seca ($\mu\text{mol Eq Trolox/ g materia seca}$). En cáscaras frescas, se obtuvo en promedio de inhibición del $14,831 \pm 3,523 \%$, lo que equivale a $6,02 \pm 1,16 \mu\text{mol Eq Trolox/ g materia seca}$. Estos resultados son menores a otros estudios de cáscara de mandarina como Kinnow y Blanco, presentando respectivamente valores de del $56,57 \pm 0,82 \%$ de inhibición (Suri et al., 2024) y de $35 \pm 2\%$ (Xu et al., 2017). Estos valores menores pueden ser influenciados por factores como la variedad, el estado de madurez o las condiciones ambientales de cultivo, según González et al., (2010). Los compuestos bioactivos presentes en los cítricos generalmente pueden ser afectados ante la exposición al oxígeno, el calor, la luz, el tiempo y la temperatura (Vázquez et al., 2022).

En el estudio, no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de inhibición entre las temperaturas evaluadas para el método SCA ($p > 0,05$), lo cual indica que los criterios de decisión para el secado por SCA, dependen del tiempo requerido para que la humedad de la cáscara disminuya a la humedad objetivo. Las muestras secas por VR presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, evidenciando un efecto de la temperatura sobre el porcentaje de inhibición ($p < 0,05$). El tratamiento de VR a 60°C presentó el mayor porcentaje de inhibición (media = $68,643 \pm 1,063 \%$) y presentó una diferencia significativa frente a los tratamientos VR a 50 y 70°C , los cuales no mostraron diferencias entre sí ($\approx 63 \%$). Se determinó, que a 60°C por VR es la temperatura para maximizar la capacidad antioxidante de las muestras. El tratamiento SS presentó una media de porcentaje de inhibición del $52,525 \pm 1,784$. No obstante, este tratamiento no fue incluido en el análisis estadístico (ANOVA) debido a que no cuenta con condiciones controladas ni replicabilidad térmica, lo cual impide una comparación válida con los tratamientos de secado controlado (SCA y VR). En la Tabla 14 se presenta el porcentaje de inhibición de los diferentes tratamientos aplicados a las muestras de cáscara de mandarina.

Tabla 14. Porcentaje de inhibición en cáscaras de mandarina secas a humedad 11% (b.h).

Método de Secado	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	CA	
		% Inhibición	$\mu\text{mol Eq Trolox/ g materia seca}$
SS	30	$52,525 \pm 1,78$	$5,416 \pm 0,1725$
	50	$49,530 \pm 6,98^A$	$6,450 \pm 0,675$
SCA	60	$51,794 \pm 3,24^A$	$6,974 \pm 0,313$
	70	$49,185 \pm 1,62^A$	$6,493 \pm 0,156$
VR	50	$63,218 \pm 1,57^A$	$5,126 \pm 0,152$
	60	$68,643 \pm 1,06^B$	$5,345 \pm 0,103$
	70	$63,671 \pm 3,05^A$	$5,093 \pm 0,295$

Letras (A-B) diferentes dentro de la misma columna indican que los valores son significativamente diferentes entre los niveles de cada tratamiento ($p < 0,05$).

Para comparar los resultados entre tratamientos independientes, como los métodos de secado, se utilizó la prueba t - Student con el fin de determinar las diferencias entre los tratamientos con mejor

desempeño, evaluados a la misma temperatura ((VR 60 °C y SCA 60 °C)) (VR 60 °C y SCA 60 °C), el resultado de este, indicó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos ($p < 0,05$), con una diferencia de $\Delta = 16,850 \%$, lo cual sugiere que la ventana de refractancia, especialmente a 60 °C, es más eficaz que el secado por aire caliente para conservar la capacidad inhibitoria.

La Figura 14 muestra el comportamiento de la capacidad antioxidante, expresada como porcentaje de inhibición, tanto en muestras frescas como secas para cada tratamiento evaluado. Se observó que todos los tratamientos de secado incrementan significativamente la capacidad antioxidante en comparación con la muestra fresca. Realizando la prueba t-student para identificar las diferencias existentes entre la cáscara en fresco y los tratamientos, se obtuvieron diferencias en promedio $\Delta SCA = 36,470 \%$, $\Delta VR = 50,350 \%$ y $\Delta SS = 37,690 \%$ (estas diferencias equivalen a incremento de CA de fresco a seco), donde la mayor diferencia se obtuvo para VR a 60 °C ($\Delta = 53,810 \%$) y la menor diferencia fue para SCA a 50 °C ($\Delta = 34,700$). Esto sugiere que los procesos de secado aplicados (SS, SCA y VR) favorecen la concentración o liberación de compuestos antioxidantes presentes en las cáscaras de mandarina. Un estudio realizado por Gómez et al., (2023) evalúa el efecto de diferentes métodos de secado en la composición fenólica y la actividad antioxidante de cáscaras de cítricos y reportan que el secado puede aumentar la actividad antioxidante debido a la liberación de ácidos fenólicos y flavonoides, además de que consideran la concentración debido a la pérdida de agua, es decir, mayor presencia de materia seca en los extractos de cáscaras secas en comparación a los extractos con cáscara fresca. Al comparar los tratamientos, destaca que el secado por ventana de refractancia, presentó mayor porcentaje de inhibición, evidenciando su eficacia para preservar o potenciar la actividad antioxidante de las cáscaras de mandarina.

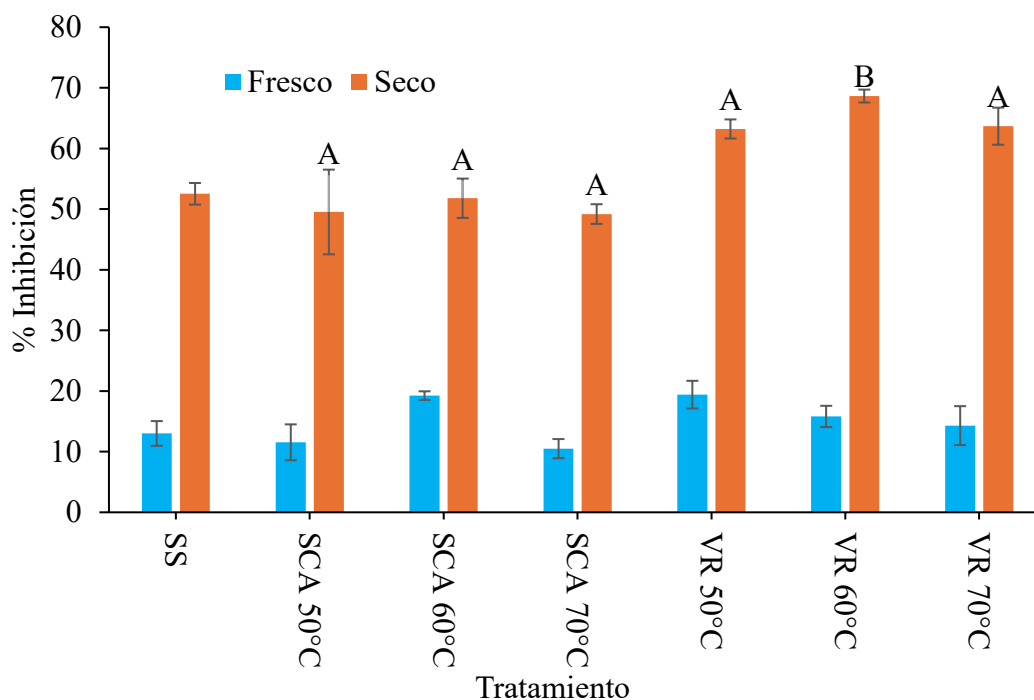


Figura 14. Porcentaje de Inhibición por cada tratamiento, fresco y seco.

Otros autores reportaron para el proceso de Secado por Infrarrojo (IRD) a temperaturas de 50, 60 y 70°C valores de $62 \pm 0,5$ %, $67 \pm 0,6$ %, $75 \pm 0,5$ % de porcentaje de inhibición respectivamente, bajo el mismo método de medición de capacidad antioxidante (Suri et al., 2024). Comparando los resultados obtenidos con la literatura entre IRD a 60° y los datos experimentales de VR a 60°C, por medio de una prueba t de 1 muestra, se obtuvo $p < 0,05$, lo que indica que existen diferencias significativas y sugiere que los datos obtenidos experimentalmente son ligeramente superiores a los mostrados en la literatura a la misma temperatura. Otra investigación realizada por Xu et al., (2017), reportaron valores entre 49 % y 55 % de porcentaje de inhibición aproximadamente para secado por medio infrarrojo a diferentes temperaturas (60, 70, 80, 90 °C), siendo este uno de los mejores tratamientos probados en esta investigación, donde también se evaluaron los métodos de Secado por Aire Caliente (HAD) y al Vacío (VD), lo que respalda la eficacia como alternativa al secado por VR frente al secado por IRD para preservar o concentrar compuestos antioxidantes de las cáscaras de mandarina.

Por otro lado, los tratamientos de secado por aire caliente (SCA) obtenidos experimentalmente, mostraron valores intermedios de porcentaje de inhibición (49,2 a 51,8 %), muy similares a los reportados por Xu et al. (2017). Al comparar entre HAD a 60°C ($49 \pm 0,5$ %) y SCA a 60°C ($51,79 \pm 3,24$ %), presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$), lo que sugiere que el método experimental de SCA obtuvo mejores resultados a los obtenidos por Xu en HAD a 60°C, esto puede deberse a que las condiciones de secado fueron diferentes, ya que en este estudio se utilizó un horno convectivo, con una velocidad de aire fija de 2,1 m/s, en donde el suministro de aire caliente se hacía de manera vertical.

Finalmente, tal como se mencionó anteriormente el tratamiento por secado solar (SS) mostró porcentajes de inhibición promedio de $52,525 \pm 1,78$ comparable con los obtenidos por secado solar (SD), reportado por Xu et al. (2017), los cuales fueron de $27 \pm 1,5$ %. Realizando la prueba t entre estos, se obtuvo un valor $p < 0,05$, lo que indica que la presente investigación presentó mayor porcentaje de inhibición frente a los reportados por Xu et al. (2017). Aunque el SS mostró eficacia en capacidad antioxidante, no fue incluido en el análisis estadístico debido a la falta de control sobre las condiciones del proceso y su baja reproducibilidad. A pesar de su bajo costo y amplia adopción, requiere entre 24 y 48 h bajo condiciones ambientales variables, lo que representa una desventaja frente al secado por VR, que logra niveles iguales o superiores de inhibición en pocas horas, dependiendo de la temperatura. La eficiencia del método de VR en tiempo, gasto energético y menor exposición de los compuestos bioactivos a factores degradantes como oxígeno y luz, (Antony & Farid, 2022), consolida al método como una alternativa con ventajas tecnológicas para su uso industrial.

Como se observa en la Tabla 14, en el presente estudio se obtuvieron valores de capacidad antioxidante entre $5,093 \pm 0,295$ y $6,974 \pm 0,313$ $\mu\text{mol Eq Trolox/ g}$ materia seca (entre todos los tratamientos). Estos valores son considerablemente más bajos en comparación con las reportadas por Shu et al. (2020). Esta diferencia evidencia la sensibilidad diferencial de los métodos analíticos y resalta la necesidad de estandarizar las condiciones experimentales para facilitar comparaciones entre estudios.

10. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió establecer que el tipo de método de secado influye significativamente en el proceso de secado de la cáscara de mandarina. El secado por ventana de refractancia (VR) mostró ser la técnica más eficiente, al requerir menor tiempo de procesamiento y mostrar una mayor eficacia en la transferencia de masa; energías de activación más bajas y los coeficientes de difusión más alto en comparación con el secado con aire caliente (SCA) y el secado solar (SS).

El modelo de Page modificado demostró ser el de mejor ajuste en las cinéticas de secado en los tres métodos de secado. Lo cual indica que este modelo es altamente preciso para predecir el proceso de secado de cáscara de mandarina bajo las condiciones de secado en los tres métodos.

Los valores de actividad de agua en las cáscaras de mandarina seca en los tres métodos alcanzaron al final del secado valores inferiores a 0,6. Esto indica que las muestras secas son estables durante el almacenamiento frente al crecimiento de microorganismos de deterioro, ya que estos no crecen por debajo de este valor.

En cuanto al cambio de color, no se observaron diferencias significativas atribuibles a la temperatura, lo que indica que esta variable no influye directamente en la apariencia del producto en el contexto del secado de cáscaras de mandarina.

Los compuestos fenólicos totales (CFT) y la capacidad antioxidante (CA) en las cáscaras de mandarina mostraron mayor retención en los tratamientos con menor tiempo de exposición al calor. En el caso de los CFT, no se presentaron diferencias significativas entre los métodos por VR y SCA. Sin embargo, para la capacidad antioxidante, el método por VR presentó mayor inhibición. En contraste, el secado solar mostró menor retención de CFT y CA, probablemente debido a su prolongado tiempo de exposición y a las condiciones de proceso no controladas.

Los resultados de esta investigación demostraron que el secado por ventana de refractancia es una técnica altamente prometedora para conservar la estabilidad de las propiedades fisicoquímicas y funcionales de la cascara de mandarina con menor tiempo de proceso.

11. REFERENCIAS

- Abeyasinghe, D. C., Li, X., Sun, C. De, Zhang, W. S., Zhou, C. H., & Chen, K. S. (2007). Bioactive compounds and antioxidant capacities in different edible tissues of citrus fruit of four species. *Food Chemistry*, 104(4), 1338–1344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.047>
- Abou-Arab, E. A., Mahmoud, M. H., & Abu-Salem, F. M. (2017). Functional properties of *Citrus peel* as affected by drying methods. *American Journal of Food Technology*, 12(3), 193–200. <https://doi.org/10.3923/ajft.2017.193.200>
- Abul-Fald, M. M., & Ghanem, T. H. (2011). Effect of refractance-window (RW) drying method on quality criteria of produced tomato powder as compared to the convection drying method. *World Applied Sciences Journal*, 15(7), 953–965.
- Aguilar Niño, P., Escobar Quijano, M., & Pedro Carvalho, C. (2012). Situación actual de la cadena de cítricos en Colombia: limitantes y perspectivas. *La Normativa y Los Estándares de Calidad Como Garantía de Competitividad*, 191–222. <http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/handle/10567/556>
- Albuquerque, J. C., de Figueirêdo, R. M. F., de Melo Queiroz, A. J., dos Santos, F. S., Santos, N. C., de Oliveira Carvalho, R., Gregório, M. G., Moura, H. V., de Macedo Albuquerque Junior, N., Amadeu, L. T. S., & dos Santos Costa, S. (2024). Processing of Maranhão mango peels by convective drying and freeze-drying: kinetic study, functional and thermal properties. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18, 6295–6309. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02648-x>
- Alva, G., Mirtha, D., & Guerrero, M. (2025). Cinética de secado de *Citrus reticulata*: influencia en el sabor y textura de una masa para empanada. *Drying kinetics of Citrus reticulata: influence on the flavor and texture of a patty dough. European Public & Social Innovation Review*, 1–18.
- Anticona, M., Blesa, J., Lopez-Malo, D., Frigola, A., & Esteve, M. J. (2021). Effects of ultrasound-assisted extraction on physicochemical properties, bioactive compounds, and antioxidant capacity for the valorization of hybrid Mandarin peels. *Food Bioscience*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101185>
- Antony, A., & Farid, M. (2022). Effect of temperatures on polyphenols during extraction. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042107>
- AOAC (1995). Method 925.10, 920.39, 925.10 and 990.03. Association of official analytical chemists official methods of analysis 16 th ed. Washington
- Artunduaga Antury, K. L., Vargas Rojas, D. A., & Barrera Bermeo, Ó. M. (2021). Conservación de las propiedades nutraceuticas del Aloe Vera (*Aloe barbadensis Miller*), mediante técnicas de secado. *Ingeniería y Región*, 25, 6–21. <https://doi.org/10.25054/22161325.2818>
- Arulkumar, M., Pandian, N. K. S., Murugan, B., Nambi, V. E., Sivaranjani, S., Baskaran, D., Pugazhenth, T. R., Kishore, S. G., & Pandiselvam, R. (2023). Drying kinetics, effective moisture diffusivity, and activation energy of osmotic pretreated hot-air-dried Paneer

- cubes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2023/7685192>
- Babbar, N., Oberoi, H. S., Uppal, D. S., & Patil, R. T. (2011). Total phenolic content and antioxidant capacity of extracts obtained from six important fruit residues. *Food Research International*, 44(1), 391–396. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.001>
- Boluda Aguilar, M. (2013). *Producción de bioetanol mediante fermentación de subproductos cítricos pretratados con steam explosion* (Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena). Repositorio Digital UPCT- Universidad Politécnica de Cartagena.
- Bozkir, H., Rayman Ergün, A., Serdar, E., Metin, G., & Baysal, T. (2019). Influence of ultrasound and osmotic dehydration pretreatments on drying and quality properties of persimmon fruit. *Ultrasonics Sonochemistry*, 54, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.02.006>
- Bozkir, H., Tekgül, Y., & Erten, E. S. (2021). Effects of tray drying, vacuum infrared drying, and vacuum microwave drying techniques on quality characteristics and aroma profile of orange peels. *Journal of Food Process Engineering*, 44(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13611>
- Calín-Sánchez, Á., Lipan, L., Cano-Lamadrid, M., Kharaghani, A., Masztalerz, K., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Figiel, A. (2020). Comparison of traditional and novel drying techniques and its effect on quality of fruits, vegetables and aromatic herbs. *Foods*, 9(9), 1261. <https://doi.org/10.3390/foods9091261>
- Chokngamvong, S., & Suvanjumrat, C. (2023). Study of drying kinetics and activation energy for drying a pineapple piece in the crossflow dehydrator. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103351>
- Corzo, O., Bracho, N., Rodríguez Justa, Pereira, A., & Vásquez, A. (2011). Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba. *SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente*, 23(1), 36–42.
- De Dios, C. A. (1996). *Secado de granos y secadoras* (FAO). <https://www.fao.org/4/x5028s/X5028S00.htm>
- Deng, L., Mujumdar, A. S., Yang, W., Zhang, Q., Zheng, Z., Wu, M., & Xiao, H. (2020). Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(1), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14294>
- Doymaz, İ. (2011). Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. *Heat and Mass Transfer*, 47, 277–285. <https://doi.org/10.1007/s00231-010-0722-3>
- Dubey, P., Tripathi, G., Mir, S. S., & Yousuf, O. (2023). Current scenario and global perspectives of citrus fruit waste as a valuable resource for the development of food packaging film. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 104190. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104190>

- Esparza-Martínez, F. J., Miranda-López, R., & Guzman-Maldonado, S. H. (2016). Effect of air-drying temperature on extractable and non-extractable phenolics and antioxidant capacity of lime wastes. *Industrial Crops and Products*, 84, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.01.043>
- FAO. (2021). *Citricos - Análisis de Mercados Agroalimentarios (FAMA)*. Recuperado de: <https://www.fao.org/markets-and-trade/commodities-overview/food-and-agricultural-markets-analysis-FAMA/es>
- Fernandes, S. S., Peraza, C. C., Marasca, N. S., & Egea, M. B. (2025). Effect of drying methods on the nutritional composition, technofunctional properties, and phytochemicals of kumquat (*Fortunella margarita*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 143, 107618. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107618>
- Flórez-Montes, C., Rojas-González, A. F., & Rodríguez-Barona, S. (2022). Bromatological characterization of fruit waste. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(1), 84–96. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v20.n1.2022.1759>
- García Ledesma, L. A. (2018). Evaluación de la aplicación del método de ventana refractiva en la deshidratación de pulpa de mango (*Mangifera indica* L.). *Ingeniería y Región*, 20, 46–51. <https://doi.org/10.25054/22161325.1934>
- García Pereira, A., Muñiz Becerá, S., Hernández Gómez, A., González, L. M., & Fernández Valdés, D. (2013). Análisis comparativo de la cinética de deshidratación Osmótica y por Flujo de Aire Caliente de la Piña (*Ananas comosus*, variedad *Cayena lisa*). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuaria*, 22(1), 62–69.
- Gebeyehu, S. K., Asemu, A. M., Haile, A. S., & Kassa, M. G. (2025). Influence of temperature and mango pulp thickness on the performance of batch window refractance dryer. *Applied Food Research*, 5(1), 100939. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100939>
- Ghanem, N., Mihoubi, D., Kechaou, N., & Mihoubi, N. B. (2012). Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content. *Industrial Crops and Products*, 40, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.03.009>
- Gómez-Mejía, E., Sacristán, I., Rosales-Conrado, N., León-González, M. E., & Madrid, Y. (2023). Effect of Storage and Drying Treatments on Antioxidant Activity and Phenolic Composition of Lemon and Clementine Peel Extracts. *Molecules*, 28(4). <https://doi.org/10.3390/molecules28041624>
- González-Hoyos, L.-V., Arroyo-Rincón, A.-M., Tobar-Suarez, A., Polanía-Rivera, A.-M., Ayala-Aponte, A., & Díaz-Ortiz, A. (2022). Obtención de “Snacks” de piña (*Ananas comosus*) mediante las técnicas combinadas de Ventana de Refractancia y Fritura con Aire Caliente*. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(1), 165–178. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v19.n2.2021.1879>
- González-Molina, E., Domínguez-Perles, R., Moreno, D. A., & García-Viguera, C. (2010). Natural bioactive compounds of Citrus limon for food and health. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 51(2), 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2009.07.027>

- Gutiérrez, E., & Pascual, G. (2016). Caracterización de cáscara de mandarina (*Citrus reticulata*) en polvo e inclusión en una formulación panaria. *Agronomía Colombiana*, 1(1), 776–778. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.sup.2016n1.57938>
- He, Y., Li, W., Zhu, P., Wang, M., Qiu, J., Sun, H., Zhang, R., Liu, P., Ling, L., Fu, X., Chun, C., Cao, L., & Peng, L. (2022). Comparison between the vegetative and fruit characteristics of “Orah” (*Citrus reticulata* Blanco) mandarin under different climatic conditions. *Scientia Horticulturae*, 300(January), 111064. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111064>
- Herman Y Lara, E., Castillo Cardoza, A. M., Martínez Sánchez, C. E., Carmona García, R., & Miranda, J. R. (2020). Secado por ventana refractiva ® empleando diferentes materiales de transferencia de calor. *Journal CIM*, 8(1), 1483–1490.
- Hossain, M. A., Shaha, L. C., Romen, T. I., Sarkar, A., Biswas, R., Ahmed, S., Islam, Md. A., Muntasir, F., Patwary, Md. A., Morais, R. M. S. C., & Morais, A. M. M. B. (2025). Synergistic Effect of Ultrasound and Osmotic Pretreatment on the Drying Kinetics and Antioxidant Properties of Satkara (*Citrus macroptera*): A Novel Preservation Strategy. *Processes*, 13(2), 384. <https://doi.org/10.3390/pr13020384>
- Hssaini, L., Ouaabou, R., Hanine, H., Razouk, R., & Idlimam, A. (2021). Kinetics, energy efficiency and mathematical modeling of thin layer solar drying of figs (*Ficus carica* L.). *Scientific Reports*, 11(21266). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00690-z>
- ICONTEC. (1997). *Fruta fresca. Naranja valencia. Especificaciones*. [NTC 4086:1997]. Recuperado de: <https://tienda.icontec.org/gp-frutas-frescas-naranja-valenciana-especificaciones-ntc4086-1997.html>
- İnan, Ö., Özcan, M. M., & Aljuhaimi, F. (2018). Effect of location and Citrus species on total phenolic, antioxidant, and radical scavenging activities of some Citrus seed and oils. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13555>
- Izli, N., Izli, G., & Taskin, O. (2018). Impact of different drying methods on the drying kinetics, color, total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple. *CyTA - Journal of Food*, 16(1), 213–221. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1381174>
- Kaur, S., Singh, V., Chopra, H. K., & Panesar, P. S. (2024). Extraction and characterization of phenolic compounds from mandarin peels using conventional and green techniques: a comparative study. *Discover Food*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00139-y>
- Khatun, P., Karmakar, A., & Chakraborty, I. (2024). Microwave-vacuum drying: Modeling validation of drying and rehydration kinetics, moisture diffusivity and physicochemical properties of dried dragon fruit slices. *Food and Humanity*, 2, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100292>
- Kumar Mahawar, M., Jalgaonkar, K., Bibwe, B., Ghodki, B. M., & Bhushan, B. (2017). Mathematical modelling and drying kinetics of kinnow and sweet lime peels. *International Journal of Chemical Studies*, 5(6), 885–888

- Kumar, D., Ladaniya, M. S., Mendke, S., Gurjar, M., & Kumar, S. (2020). Optimized extraction, quality characterization of Nagpur mandarin (*Citrus reticulata*) peel pectin. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 90(5), 985–989. <https://doi.org/10.56093/ijas.v90i5.104377>
- Maciel, C., Meneses, R., Danielski, R., Sousa, S., Komora, N., & Teixeira, P. (2023). Tangerine (*Citrus reticulata*). In *Recent Advances in Citrus Fruits* (pp. 131–218). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37534-7_6
- Mahanti, N. K., Chakraborty, S. K., Sudhakar, A., Verma, D. K., Shankar, S., Thakur, M., Singh, S., Tripathy, S., Gupta, A. K., & Srivastav, P. P. (2021). Refractance WindowTM-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments. *Future Foods*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100024>
- Marín, F. R., Soler-Rivas, C., Benavente-García, O., Castillo, J., & Pérez-Alvarez, J. A. (2007). By-products from different citrus processes as a source of customized functional fibres. *Food Chemistry*, 100(2), 736–741. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.04.040>
- Martínez Anaya, M. M., & Pechene Quintero, J. C. (2017). Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia. *Memorias De Congresos UTP*, 194–201. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1493/2174>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G. P., & Figiel, A. (2016). Physicochemical properties of whole fruit plum powders obtained using different drying technologies. *Food Chemistry*, 207, 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.075>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). Cadena de Cítricos, Indicadores e Instrumentos Primer semestre de 2020. In *Miniagricultura*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/2020-03-30%0ACifras%0ASectoriales.pdf>
- Mishra, M., Kandasamy, P., Shukla, R. N., & Kumar, A. (2021). Convective Hot-air Drying of Green Mango: Influence of Hot Water Blanching and Chemical Pretreatments on Drying Kinetics and Physicochemical Properties of Dried Product. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 732–757. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1930626>
- Mohamed Ahmed, I. A., Özcan, M. M., Uslu, N., Mohammed, B. M., & Adiamo, O. (2024). The Effects of Microwave and Oven Drying on Bioactive Compounds Individual Phenolic Constituents and the Fatty Acid Profiles of Bitter Orange, Mandarin and Grapefruit Peel and Oils. *Waste and Biomass Valorization*, 15(8), 4735–4746. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02488>
- Mujumdar, A. S., & Law, C. L. (2010). Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 3(6), 843–852. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>
- Ni, H., Chen, L., Yan, X., Pan, H., Li, L., Yang, Y., Chen, Y., Hu, Y., Chen, F., & He, F. (2024). Effects of different drying processes on the flavonoids characteristics of Guanxi honey pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peel by HPLC-Q-TOF-MS analysis. *European Food*

- Research and Technology*, 250(7), 1987–1998. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04508-w>
- Ocoro Z, M. U., & Ayala A, A. A. (2012). Evaluación de la técnica de ventana de refractancia® en el secado de pure de Papaya (*Carica papaya* L.). *Vitae*, 19(1), S72-S74. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1698/169823914016.pdf>
- Ordoñez-Gómez, E. S., Reátegui Díaz, D., & Villanueva Tiburcio, J. E. (2018). Polifenoles totales y capacidad antioxidante en cáscara y hojas de doce cítricos. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 113-121. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.13>
- Ordoñez-Santos, L. E., Esparza-Estrada, J., & Vanegas-Mahecha, P. (2020). Potencial agroindustrial del epicarpio de mandarina como alternativa de colorante natural en pan. *TecnoLógicas*, 23(48), 17-29. <https://doi.org/10.22430/22565337.1465>
- Ortiz-Jerez, M. J., Serna, Y. X., & Zapata, y J. E. (2024). Kinetics of conductive hydro-drying of pumpkin (Cucurbita moschata) pulp. *Heliyon*, 10(17). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36982>
- Ozcan-Sinir, G., Ozkan-Karabacak, A., Tamer, C. E., & Copur, O. U. (2019). The effect of hot air, vacuum and microwave drying on drying characteristics, rehydration capacity, color, total phenolic content and antioxidant capacity of Kumquat (Citrus japonica). *Food Science and Technology*, 39(2), 475–484. <https://doi.org/10.1590/fst.34417>
- Padilla-Frías, K. A., Granados-Conde, C., Leon-Mendez, G., Arrieta Pineda, Y., & Torrenegra-Alarcon, M. (2018). Evaluación de la influencia de la temperatura en procesos de secado. *@limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 16(1), 107–117.
- Panagiotou, N. M., Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2004). Moisture Diffusivity: Literature Data Compilation for Foodstuffs. *International Journal of Food Properties*, 7(2), 273–299. <https://doi.org/10.1081/JFP-120030038>
- Peñaranda Gonzalez, L. V., Montenegro Gómez, S. P., & Giraldo Abad, P. A. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 141-150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Peng, Z., Li, W., Wang, Y., Zhu, L., Yang, D., Zhao, G., Zhong, P., & Zhao, Z. (2025). The physicochemical properties of low molecular weight ‘Chachi’ (Citrus reticulata ‘Chachi’) pectins prepared by different modification methods and their modulation effects on the human gut microbiota. *Food Hydrocolloids*, 166, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111350>
- Perea-Flores, M. J., Garibay-Febles, V., Chanona-Pérez, J. J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J. V., Palacios-González, E., & Gutiérrez-López, G. F. (2012). Mathematical modelling of castor oil seeds (Ricinus communis) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures. *Industrial Crops and Products*, 38(1), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.008>
- Rafiq, S., Singh, B., & Gat, Y. (2019). Effect of different drying techniques on chemical composition, color and antioxidant properties of kinnow (*Citrus reticulata*) peel. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2458–2466. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03722-9>

- Raghavi, L. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2018). Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 222, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032>
- Rahman, N. F., Shamsudin, R., Ismail, A., Shah, N. N. A. K., & Varith, J. (2018). Effects of drying methods on total phenolic contents and antioxidant capacity of the pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peels. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 50, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.01.009>
- Ramadan, M. F., & Farag, M. A. (2022). Mediterranean Fruits Bio-wastes: Chemistry, Functionality and Technological Applications. In *Mediterranean Fruits Bio-wastes: Chemistry, Functionality and Technological Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84436-3>
- Rivera Agredo, Y., Guevara Guerrero, B., & Díaz Urbano, C. E. (2019). Evaluación fisicoquímica, nutricional y microbiológica en banano (*Cavendish Valery*) deshidratado por Liofilización, Ventana de Refractancia y Convección forzada. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 6(1), 95–102. <https://doi.org/10.23850/24220582.2032>
- Sehrawat, R., Nema, P. K., & Kaur, B. P. (2018). Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air-drying methods. *Lwt*, 92(December 2017), 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.012>
- SENASICA; Gobierno de México. (2022). Análisis de impacto económico ante un posible establecimiento y dispersión del cancro de los cítricos en México en áreas comerciales. 1, 1–14.
- Shiny Derose, J., Nagamaniammai, G., Daradkeh, G., Qoronfleh, W., & I-Mahrizi, M. (2021). Impact of the Drying Techniques on the Functional Properties of Citrus sinensis (Sweet Orange) Fruit - A Review. *International Journal of Nutrition, Pharmacology, Neurological Diseases*, 11(3), 181–188.
- Shu, B., Wu, G., Wang, Z., Wang, J., Huang, F., Dong, L., Zhang, R., Wang, Y., & Su, D. (2020). The effect of microwave vacuum drying process on citrus: drying kinetics, physicochemical composition and antioxidant activity of dried citrus (*Citrus reticulata* Blanco) peel. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 14(5), 2443–2452. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00492-3>
- Silva Paz, R. J., Mateo Mendoza, D. K., Eccoña Sota, A., & Della Rocca, P. A. (2022). Secado de hojas de muña (*Minthostachys mollis*): Modelado, cinética y propiedades termodinámicas. *Enfoque UTE*, 13(4). <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.827>
- Soledad Tapia, M. (2020). Contribución al Concepto de Actividad del Agua (a_w) y su Aplicación en la Ciencia y Tecnología de Alimentos en Latinoamérica y Venezuela. *Boletín de La Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, 18–40. <https://boletines.acfiman.org/wp-content/uploads/2021/01/Paginas-desde-23-45-SEGUNDO-ARTICULO.pdf>

- Suri, S., Singh, A., & Nema, P. K. (2024). Infrared drying of Kinnow (*Citrus reticulata*) peel waste: kinetics and quality characterization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(6), 7579–7590. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02844-z>
- Tejeda, L., Marimón, W., & Medina, M. (2014). Evaluation of the potential of fruit peels in obtaining bioethanol. *Hechos Microbiológicos*, 5(1), 4–9. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.323244>
- Vargas y Vargas, M. de L., Figueroa Brito, H., Tamayo Cortez, J. A., Toledo López, V. M., & Moo Huchin, V. M. (2019). Aprovechamiento de cáscaras de frutas: análisis nutricional y compuestos bioactivos. *CIENCIA Ergo-Sum*, 26(2). <https://doi.org/10.30878/ces.v26n2a6>
- Vázquez-Ovando, A., Mejía-Reyes, J. D., García-Cabrera, K. E., & Velázquez-Ovalle, G. (2022). Capacidad antioxidante: conceptos, métodos de cuantificación y su aplicación en la caracterización de frutos tropicales y productos derivados. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 9(1), 9–33. <https://doi.org/10.23850/24220582.4023>
- Wang, X., Shi, K., Cao, X., Guo, J., Yi, H., Chen, Y., & Pan, S. (2025). Effects of different drying methods on the drying kinetics and quality characteristics of Orah (*Citrus reticulata*) slices. *Food Science and Biotechnology*, 34(9), 1897–1906. <https://doi.org/10.1007/s10068-024-01811-w>
- Wang, Z., Zhong, T., Mei, X., Chen, X., Chen, G., Rao, S., Zheng, X., & Yang, Z. (2023). Comparison of different drying technologies for brocade orange (*Citrus sinensis*) peels: Changes in color, phytochemical profile, volatile, and biological availability and activity of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 425(1). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136539>
- Xiao, H., Gao, Z., Lin, H., & Yang, W. (2010). Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes. *Journal of Food Process Engineering*, 33(5), 899–918. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00314.x>
- Xu, M., Tian, G., Zhao, C., Ahmad, A., Zhang, H., Bi, J., Xiao, H., & Zheng, J. (2017). Infrared drying as a quick preparation method for dried tangerine peel. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/6254793>
- Yepes, S. M., Montoya Naranjo, L. J., & Orozco Sánchez, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales-frutas-en Medellín y el sur del Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4422–4431.
- Yue, F., Zhang, F., Qu, Q., Wang, C., Qin, Y., Ma, L., Jia, Y., Ismael, M., Jiang, Y., Sun, T., Lü, X., & Wang, X. (2023). Effects of ageing time on the properties of polysaccharide in tangerine peel and its bacterial community. *Food Chemistry*, 417(November 2022), 135812. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.13581>
- Zhang, Y., Sun, Y., Xi, W., Shen, Y., Qiao, L., Zhong, L., Ye, X., & Zhou, Z. (2014). Phenolic compositions and antioxidant capacities of Chinese wild mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruits. *Food Chemistry*, 145, 674–680. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.012>

Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2015). Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. *Food Research International*, 69, 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>

ANEXOS

En la Figuras 15 y 16 se presentan las curvas de calibración utilizadas para determinar la concentración de CFT y CA respectivamente.

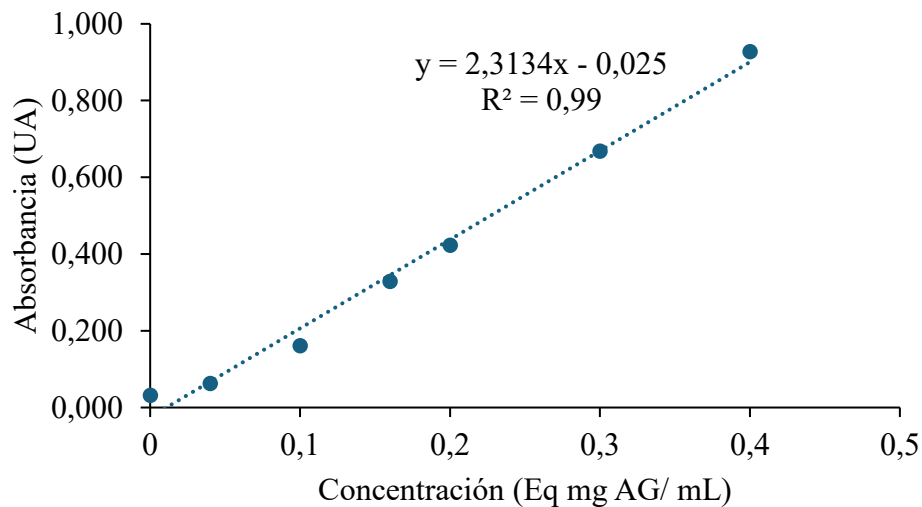


Figura 15. Curva de calibración para componentes fenólicos totales.

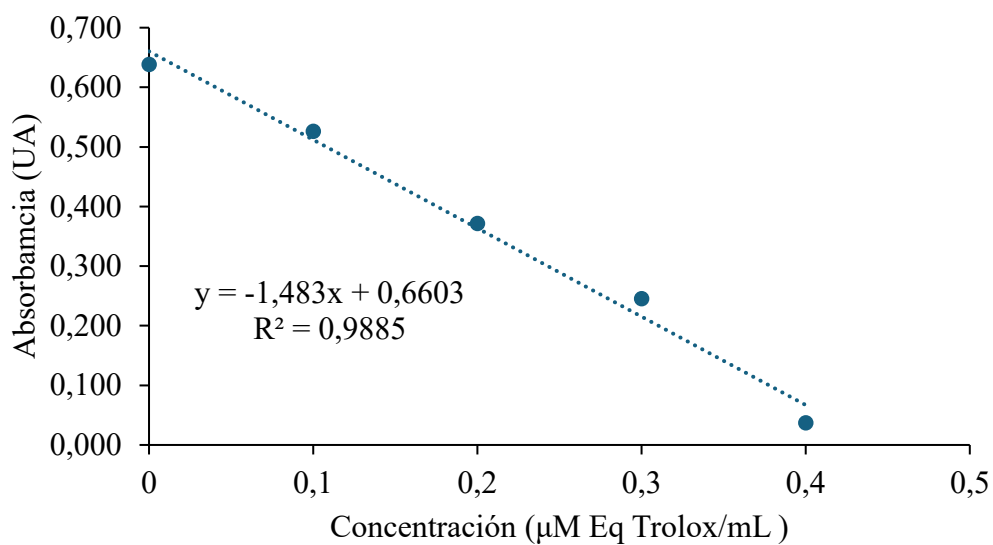


Figura 16. Curva de calibración para capacidad antioxidante.