



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: Efecto de diferentes pre-tratamientos sobre la cinética de secado y las propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida a partir de residuos de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Luis Sebastian Pinto Laguna

Tutor: Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato - Ecuador

Julio - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 23 de junio de 2025

Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos
1804067088

TUTORA

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Sebastian Pinto Laguna, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Luis Sebastian Pinto Laguna
1804386892

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de éste, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor



Luis Sebastian Pinto Laguna
1804386892

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

Presidente del Tribunal

Mg. María Eugenia García Pazmiño
2100248505

Mg. Juan de Dios Espinoza Moya
1803201431

Ambato, 07 de julio de 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación con profundo amor y gratitud a mi madre Vilma Laguna, que con sus consejos, exigencias y gritos a hecho de mí, un buen hijo, por ser mi mayor ejemplo de fortaleza, sacrificio y entrega, por su amor incondicional y por enseñarme que los sueños si se cumplen. A ella le debo cada paso que he logrado en este camino. Te amo mamá.

A mi hermano, Ing. Stalin Jesús, por su apoyo silencioso pero constante, por estar siempre presente cuando más lo necesito y por ser mi guía en cada desafío. Aunque sus palabras sean pocas, su presencia y fortaleza han sido un pilar fundamental en mi camino, brindándome motivación y confianza para seguir adelante.

A mi novia, Nicole López, por su amor, su alegría contagiosa y su fe inquebrantable, por enseñarme que los pequeños momentos pueden ser los más bonitos de la vida. Su confianza en mí me ha dado la fuerza para seguir adelante, convirtiendo cada obstáculo en un impulso para crecer.

Gracias por ser parte de este logro.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mi tutora, M.Sc. Liliana Acurio, por su guía académica, orientación técnica y por creer en el valor de esta investigación. Su acompañamiento constante fue clave para culminar este proyecto con responsabilidad y compromiso.

Extiendo también mi gratitud a la Universidad, Docentes, Compañeros y Profesionales del área de Ingeniería en Alimentos que aportaron con sus conocimientos y consejos a lo largo de mi formación.

A Pamela Lascano, David Almeida, Martin y Danna Almeida, quienes me acogieron como uno más de su familia, por brindarme su amor y cariño incondicional.

A Alejandro y Anthony López, gracias por sus palabras de ánimo, su afecto y respaldo.

A Marina Fonseca y Paulina Guevara, quienes con su alegría, consejos y muestras de afecto me acompañaron en este proceso.

Y a todas las personas que, de una u otra forma, fueron parte de este camino.

Gracias por acompañarme en esta etapa tan significativa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN EJECUTIVO.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1 Antecedentes investigativos	1
1.1.1. Justificación	1
1.1.2 Fundamentación teórica	2
1.1.2.1 Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i> Plenck).....	2
1.1.2.1.1 Origen.....	2
1.1.2.1.2 Descripción.....	2
1.1.2.1.3 Composición nutricional de los residuos de brócoli (tallos, hojas, y pequeñas cabezas florales).....	3
1.1.2.2 Secado.....	4
1.1.2.2.1 Condiciones de secado	5
1.1.2.3 Tratamientos previos al secado.....	5
1.1.2.3.1 Residuos de brócoli en agua (ebullición)	5
1.1.2.3.2 Residuos de brócoli a vapor	6
1.1.2.3.3 Residuos de brócoli en microondas.....	6
1.1.2.4 Cinética de secado	6
1.1.2.4.1 Coeficiente de difusión efectivo del agua	6
1.1.2.4.2 Modelos matemáticos.....	7
1.2 Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	7

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA.....	8
2.1. Materiales.....	8
2.2. Métodos	9
2.2.1. Construir la curva de cinética de secado de los residuos de Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i> Plenck) sometido a diferentes pretratamientos	9
2.2.1.1. Materia prima	9
2.2.1.2. Tratamientos previos	9
2.2.1.2.1. Control.....	9
2.2.1.2.2. Agua en ebullición	9
2.2.1.2.3. Vapor.....	9
2.2.1.2.4. Microondas.....	9
2.2.1.3. Secado y elaboración de harina	10
2.2.1.4. Determinación de humedad.....	10
2.2.2. Correlacionar los datos de la curva de cinética de secado con modelos matemáticos	10
2.2.2.1. Modelo matemático de la cinética de secado	10
2.2.2.2. Análisis Estadístico.....	11
2.2.3. Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la harina	11
2.2.3.1. Determinación de pH y °Brix	11
2.2.3.2. Acidez.....	12
2.2.3.3. Contenido de agua (x_w) y actividad del agua (a_w)	12
2.2.4. Diseño experimental.....	12
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
3.1 Análisis y discusión de los resultados	13
3.1.1. Humedad y actividad de agua (a_w) de los residuos de brócoli sometidos a diferentes pretratamientos.....	13
3.1.2. Curvas de cinética de secado de los residuos de brócoli.....	14
3.1.3. Curvas de velocidad de secado.....	18
3.1.4. Modelados matemáticos de la cinética de secado.....	21
3.1.5. Propiedades fisicoquímicas de la harina de residuos de brócoli	23
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
4.1 Conclusiones.....	28
4.2. Recomendaciones.....	29
BIBLIOGRAFÍA	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recursos y materiales utilizados	8
Tabla 2. Principales modelos de la cinética de secado para una mejor precisión	10
Tabla 3. Parámetros para el describir la cinética de secado	11
Tabla 4. Variables para evaluar el efecto de los pretratamientos y parámetros aplicados.....	12
Tabla 5. Humedad y actividad de agua (a_w) de los residuos de brócoli antes y después del secado.....	14
Tabla 6. Tiempo de secado óptimo y tasas de pérdida de humedad	17
Tabla 7. Humedad crítica y de equilibrio, etapas de perdida de humedad, velocidad de secado y tiempo.	19
Tabla 8. Velocidad de pérdida de agua en el modelado de la cinética de secado	22
Tabla 9. Coeficiente de difusión del agua aplicada en los pretratamientos	23
Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas de la harina de residuos de brócoli obtenida con los diferentes pretratamientos.....	24
Tabla 11. Prueba de múltiples rangos (Tukey HSD) de las pendientes de la cinética de secado.	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i> Plenck)	3
Figura 2. Curvas de la cinética de secado de las muestras aplicadas con los distintos pretratamientos.....	15
Figura 3. Curvas experimentales a diferentes pre-tratamientos.....	16
Figura 4. Curvas de velocidad de secado a diferentes pre-tratamientos.....	20
Figura 5. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD)	25
Figura 6. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD) de la acidez	26
Figura 7. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD) de la primera fase de la cinética de secado.....	27
Figura 8. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD) de la segunda fase de la cinética de secado.....	27

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación evaluó el efecto de distintos pretratamientos térmicos – cocción en agua, vapor y microondas – sobre la cinética de secado y las propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida a partir de residuos de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck). Con ésta se busca promover el aprovechamiento integral de subproductos vegetales, reduciendo el desperdicio agroindustrial y contribuyendo a la sostenibilidad alimentaria. Los residuos fueron sometidos a procesos de precocción y posteriormente deshidratados mediante secado convectivo. Se construyeron curvas de cinética de secado, determinando parámetros clave como la humedad crítica, coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) y tasas de pérdida de humedad en diferentes etapas. Además, se evaluaron propiedades fisicoquímicas de las harinas obtenidas: humedad, actividad de agua (a_w), pH, grados Brix y acidez titulable. Los resultados revelaron que los pretratamientos influyen significativamente en la eficiencia del secado y en la calidad final del producto. La cocción en agua mostró la mayor tasa inicial de secado, mientras que el pretratamiento con vapor mostró una menor actividad de agua y mayor estabilidad. El tratamiento por microondas, aunque aceleró el secado, presentó menor eficiencia en la etapa de difusión interna. Finalmente, las harinas obtenidas mostraron diferencias significativas en acidez y grados Brix, destacándose el pretratamiento con vapor como el más equilibrado, de forma que este estudio aporta evidencia científica aplicable al desarrollo de ingredientes funcionales a partir de residuos vegetales, fortaleciendo prácticas de economía circular en la industria alimentaria ecuatoriana.

Palabras clave: brócoli, residuos agroindustriales, pretratamientos térmicos, cinética de secado, harina vegetal, propiedades fisicoquímicas.

ABSTRACT

This research evaluated the effect of different thermal pretreatments – boiling in water, steaming, and microwave heating – on the drying kinetics and physicochemical properties of flour produced from broccoli residues (*Brassica oleracea var. italica* Plenck). The study aimed to promote the integral utilization of vegetable by-products to reduce agro-industrial waste and support food sustainability. Broccoli residues underwent various pretreatments and were then dehydrated through convective drying. Drying kinetics were assessed by constructing moisture loss curves and estimating key parameters such as critical moisture content, effective moisture diffusivity (D_{eff}), and moisture loss rates. Additionally, the physicochemical properties of the flours were analyzed, including moisture content, water activity (a_w), pH, degrees Brix, and titratable acidity. The results showed that pretreatments significantly affect both drying efficiency and final product quality. Water boiling achieved the highest initial drying rate, while steaming led to the lowest water activity and greatest microbial stability. Microwave treatment, although faster in moisture removal, showed reduced performance during the diffusion-dominated drying phase. The resulting flours presented significant differences in acidity and degrees Brix, with the steam treatment producing the most balanced outcomes, so this study provides scientific insights for the development of functional ingredients derived from vegetable waste, reinforcing circular economy practices in the Ecuadorian food industry.

Keywords: broccoli, agro-industrial waste, thermal pretreatments, drying kinetics, vegetable flour, physicochemical properties.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1. Justificación

En el contexto actual de la creciente preocupación por la sostenibilidad alimentaria y la economía circular, la valorización de residuos agroindustriales emerge como una estrategia prioritaria para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia productiva. El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), reconocido por su alto valor nutricional, ilustra este desafío: durante su procesamiento industrial se generan hasta un 40% de residuos no comercializables (pequeños floretes, tallos, hojas y subproductos de inflorescencias), los cuales, pese a su riqueza en compuestos bioactivos, son frecuentemente desechados (**Bas, 2023**). Estos subproductos contienen concentraciones significativas de fibra dietética (30-40% en base seca), glucosinolatos (precursores de isotiocianatos con propiedades anticancerígenas), antioxidantes (flavonoides, ácido clorogénico), vitaminas (A, C, K, folatos) y minerales esenciales (calcio, hierro, potasio), equiparables a las presentes en las partes destinadas al consumo fresco. Sin embargo, su alta humedad inicial (85-90%) los hace susceptibles a degradación microbiana y enzimática, limitando su aprovechamiento directo (**Delgado, 2020**).

La transformación de estos residuos en harinas funcionales mediante secado controlado representa una solución técnica y económicamente viable, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 (Producción y Consumo Responsables) y 13 (Acción por el Clima). Por lo que la elaboración de esta harina requiere un análisis riguroso de la cinética de secado y propiedades fisicoquímicas para garantizar la escalabilidad industrial y la aplicabilidad en matrices alimentarias (panificación, sopas, suplementos) (**Salvador, 2022**).

Esta investigación aborda estas brechas al evaluar sistemáticamente el efecto de pre-tratamientos térmicos sobre la cinética de secado y las propiedades funcionales de la harina de brócoli, con el fin de contribuir de forma positiva a reducir pérdidas postcosecha mediante la conversión de residuos en ingredientes de alto valor añadido, además de generar evidencia científica para impulsar a la sostenibilidad económica circular en la industria alimentaria. Los resultados esperados no solo beneficiarán a productores y procesadores, sino también a consumidores que demandan alimentos sostenibles y funcionales, consolidando un modelo de producción más responsable y eficiente.

1.1.2 Fundamentación teórica

1.1.2.1 Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)

1.1.2.1.1 Origen

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) es una hortaliza proveniente de la región del Mediterráneo Oriental, con áreas específicas de procedencia que incluyen partes de Asia Menor, como Libia y Siria. Cultivo que pertenece a la familia Brassicaceae, se ha desarrollado a lo largo de los siglos mediante procesos de selección y mejora genética, lo que ha dado lugar a una amplia diversidad de variedades dentro del grupo de las coles. Su introducción en Europa y América Latina se remonta al siglo XVI, con una notable popularización en Italia, donde se consolidó como un alimento de consumo habitual. En el Ecuador se cultiva especialmente en la Sierra Central-Norte, en las provincias de Cotopaxi, Pichincha y Tungurahua **(FAO, 2020)**.

1.1.2.1.2 Descripción

El brócoli comparte su pertenencia al grupo de las crucíferas con otras hortalizas de importancia económica y alimentaria, como la coliflor y los repollos. Su distintivo sabor y aroma están asociados a la presencia de glucosinolatos, compuestos bioactivos que no solo otorgan propiedades organolépticas al brócoli, sino que también benefician al suelo donde se cultiva. Su constante mejora lo han convertido en un alimento de gran relevancia en la dieta moderna debido a sus características nutricionales y su potencial impacto positivo en la salud **(Vázquez et al., 2020)**.

Es una planta herbácea que se cultivada en climas templados. Se caracteriza por su tallo central firme, hojas grandes de color verde oscuro y una inflorescencia compuesta por pequeños botones florales compactos, los cuales constituyen la parte comestible más común. Sin embargo, desde el punto de vista agroindustrial, tanto los tallos como las hojas representan una fracción significativa de la biomasa total, y a menudo son descartados durante el procesamiento **(FAO, 2020)**. Estos subproductos, lejos de ser considerados residuos, contienen importantes cantidades de compuestos fitoquímicos como glucosinolatos, sulforafano, polifenoles y fibra dietética. Su alto contenido de vitamina C, provitamina A, potasio, calcio y magnesio, les otorga valor funcional para aplicaciones alimenticias y nutraceuticas **(Domínguez et al., 2010)**.

En el contexto ecuatoriano, el cultivo de brócoli adquirió importancia hacia finales de la década de 1990, impulsado principalmente por la creciente demanda en los mercados internacionales y la capacidad innovadora de los pequeños productores locales. Este cultivo ha pasado a desempeñar un papel significativo en la economía rural, contribuyendo al bienestar de las comunidades agrícolas. Su introducción en el país forma parte de una estrategia más amplia de diversificación agrícola, que busca responder a las dinámicas del comercio global. En la actualidad, el brócoli se posiciona como un producto de exportación clave, favoreciendo tanto el desarrollo económico como social en diversas regiones del Ecuador (Le, 2009).



Figura 1. Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)

1.1.2.1.3 Composición nutricional de los residuos de brócoli (tallos, hojas, y pequeñas cabezas florales)

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck), desde el punto de vista nutricional, presenta en los tallos un contenido significativo de fibra insoluble, almidones resistentes y compuestos bioactivos similares a los presentes en las inflorescencias. Además, contienen aproximadamente 2,7 g de fibra dietética por cada 100 g, así como compuestos fenólicos con propiedades antioxidantes. Por otra parte, las hojas de brócoli tienen un perfil nutricional incluso más concentrado, especialmente en calcio (hasta 200 mg por 100 g), vitamina A (en forma de β -caroteno) y luteína, lo que las convierte en un ingrediente de interés para la industria nutracéutica (Campas et al., 2009). Las pequeñas inflorescencias no comercializables también conservan un alto contenido de vitamina C y compuestos sulfurosos como el glucorafanina, el cual se transforma en sulforafano, un potente antioxidante con propiedades anticancerígenas.

En cuanto a los micronutrientes, los residuos de brócoli son especialmente ricos en vitaminas y minerales. Las hojas concentran altos niveles de vitamina K, esencial para procesos de coagulación sanguínea y la salud ósea, mientras que la vitamina C, abundante en todas las partes de la planta, es fundamental para el sistema inmunológico. Asimismo, los residuos contienen minerales como calcio, hierro y potasio, que desempeñan roles importantes en la salud ósea, la producción de glóbulos rojos y la regulación de la presión arterial **(Jin et al., 2014)**.

El aprovechamiento de los residuos del brócoli, como tallos, hojas y cabezas florales muy pequeñas, no solo contribuye a la reducción del desperdicio alimentario, sino que también incrementa la ingesta de nutrientes esenciales y compuestos bioactivos. Incorporar estos subproductos en la dieta humana o en la elaboración de alimentos funcionales puede mejorar significativamente la salud pública y fomentar prácticas más sostenibles en la industria alimentaria.

1.1.2.2 Secado

El secado es una operación unitaria fundamental en la industria alimentaria, cuyo objetivo principal es reducir el contenido de humedad de los productos para inhibir el crecimiento microbiano y prolongar su vida útil. En el caso del brócoli, el secado permite la conservación de sus compuestos bioactivos y facilita su transformación en productos de valor agregado, como harinas funcionales.

La eficiencia del secado depende de múltiples factores, incluyendo la temperatura, la velocidad del aire, la humedad relativa y las características intrínsecas del producto, como su composición y estructura celular. Un control adecuado de estos parámetros es esencial para garantizar la calidad del producto final y la retención de nutrientes sensibles al calor. Diversos estudios han explorado las condiciones óptimas de secado para el brócoli. La importancia de seleccionar temperaturas adecuadas que permitan un secado eficiente sin comprometer los compuestos sensibles al calor presentes en el brócoli **(Krajewska et al., 2024)**.

Además, el secado no solo afecta la humedad del producto, sino también su textura, color y contenido nutricional. Un secado inadecuado puede conducir a la degradación de compuestos bioactivos y a cambios indeseables en la apariencia del producto. Por lo tanto, es esencial optimizar las condiciones de secado para preservar las propiedades deseadas del brócoli **(Reyes et al., 2012)**.

1.1.2.2.1 Condiciones de secado

La temperatura de secado es uno de los parámetros más influyentes en la eficiencia del proceso. Estudios han demostrado que temperaturas elevadas pueden acelerar la tasa de secado, pero también pueden provocar la degradación de compuestos sensibles al calor, como la vitamina C y los glucosinolatos presentes en el brócoli. El efecto de diferentes condiciones de liofilización en brócoli preprocesado y encontraron que la temperatura y el espesor del producto influyen significativamente en la retención de sulforafano, un compuesto bioactivo con propiedades anticancerígenas (**Mahn et al., 2016**).

La velocidad del aire durante el secado también desempeña un papel importante. Una mayor velocidad puede mejorar la transferencia de calor y masa, reduciendo el tiempo de secado. Sin embargo, velocidades excesivas pueden causar daños físicos en el producto, como el colapso estructural o la formación de una capa superficial seca que impide la salida de humedad interna. El efecto de las condiciones de procesado sobre la cinética de secado y las propiedades antioxidantes de tallos de brócoli, destacando la importancia de optimizar la velocidad del aire para preservar la calidad del producto (**Zhang et al., 2024**).

1.1.2.3 Tratamientos previos al secado

Los tratamientos previos al secado son procesos aplicados a los alimentos antes del secado, con el objetivo de mejorar la eficiencia del secado y preservar la calidad del producto final. En el caso del brócoli, estos tratamientos pueden influir significativamente en la retención de nutrientes, la textura, el color y la capacidad de rehidratación del producto deshidratado.

1.1.2.3.1 Residuos de brócoli en agua (ebullición)

El tratamiento térmico por ebullición consiste en sumergir los residuos vegetales en agua a 100 °C durante un tiempo determinado, con el objetivo de modificar su estructura celular, facilitar el secado posterior y reducir la carga microbiana. En el caso del brócoli, presenta una alta humedad inicial y una estructura fibrosa que puede dificultar el secado. De igual manera reducir la actividad enzimática responsable del pardeamiento, como el polifenol oxidasa, lo cual favorece la estabilidad del color y la calidad sensorial de la harina obtenida (**Moraflores, 2013**).

1.1.2.3.2 Residuos de brócoli a vapor

Proceso por el cual se aplica calor por medio de vapor de agua, sin contacto directo con el líquido. Este método tiene la ventaja de ser menos agresivo en términos de lixiviación de nutrientes y es ampliamente utilizado en la industria para preservar compuestos bioactivos sensibles al agua. A diferencia de la ebullición, el vapor penetra gradualmente la matriz vegetal, modificando su estructura sin causar la pérdida excesiva de compuestos solubles (**Moraflores, 2013**).

1.1.2.3.3 Residuos de brócoli en microondas

El pretratamiento con microondas implica la exposición de los residuos de brócoli a radiación electromagnética de alta frecuencia (generalmente 2450 MHz), que genera un calentamiento volumétrico desde el interior del producto hacia el exterior. Este tipo de tratamiento puede acelerar significativamente el proceso de secado posterior, debido a que provoca la ruptura de la estructura celular y aumenta la porosidad del tejido (**Alibas, 2007**).

1.1.2.4 Cinética de secado

La cinética de secado describe la relación temporal entre la pérdida de humedad de un material y las condiciones externas del proceso, como temperatura, velocidad del aire y pretratamientos aplicados. Representada mediante curvas de secado, que permiten identificar las etapas del proceso: una fase inicial rápida y otra posterior más lenta, en la que domina la difusión del agua hacia la superficie del alimento (**Zhang et al., 2024**).

1.1.2.4.1 Coeficiente de difusión efectivo del agua

Este parámetro es esencial a la hora de cuantificar la capacidad del agua para moverse desde el interior del alimento hacia su superficie durante el secado. Se expresa en unidades de m^2/s y se calcula a partir de la solución de la segunda ley de Fick, considerando geometrías específicas como láminas delgadas o cilindros (**Simpson et al., 2017**).

El D_{eff} es un criterio útil para comparar el impacto de diferentes tratamientos sobre la facilidad de secado de productos vegetales, y su evaluación permite predecir el comportamiento del proceso a escala industrial.

1.1.2.4.2 Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos de secado son herramientas fundamentales para describir la evolución del contenido de humedad en función del tiempo, permitiendo la optimización de procesos. En alimentos, se utilizan principalmente modelos empíricos de capa delgada, debido a su simplicidad y buen ajuste a datos experimentales (**Erbay & Icier, 2010**). Donde estos modelos permiten simular diferentes condiciones de operación, predecir tiempos óptimos de secado y minimizar el deterioro de las propiedades nutricionales y funcionales del producto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Evaluar el efecto de diferentes pre-tratamientos sobre la cinética de secado y las propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida a partir de residuos de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck).

1.2.2 Objetivos específicos

- Construir la curva de cinética de secado de residuos de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) sometidos a diferentes pretratamientos.
- Correlacionar los datos de la curva de cinética de secado con modelos matemáticos referenciales.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida a partir de residuos de brócoli.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Para el presente trabajo de investigación, se utilizó tanto recursos propios, como de los que se puede encontrar en los laboratorios disponibles de la UODIDE que se hallan en la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1.
Recursos y materiales utilizados

Reactivos	Cantidad
Agua destilada	1000 ml
Hidroxido de sodio (0,02N)	500 ml
Fenolftaleina (0,1%)	500 ml
Equipos	Tiempo [h]
Camara de secado	32
Cocina industrial	1
Microondas	1
Balanza analítica	32
pH-metro	32
Aqualab	32
Balanza de infrarrojo	32
Thermomix	1
Materiales	Unidades
Bandejas	4
Espátula cuchara	1
Varilla de agitación	4
Matraz	1
Cuchillo	1
Tablas de picar	1
Papel aluminio	1

2.2. Métodos

2.2.1. Construir la curva de cinética de secado de los residuos de Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) sometido a diferentes pretratamientos

2.2.1.1. Materia prima

En esta investigación se empleó la especie *Brassica oleracea* var. *italica* Plenck, misma que fue obtenida en el mercado mayorista de la provincia de Tungurahua. En el laboratorio, se procedió a seleccionar los residuos en función de su madurez comercial y sus características físicas. Así mismo, de garantizar el cumplimiento de las BPM, y una adecuada limpieza y desinfección del área y manipulación de las muestras seleccionadas.

2.2.1.2. Tratamientos previos

Los pretratamientos desempeñaron un papel crucial en el proceso de secado, ya que contribuyeron a eliminar ceras protectoras, inactivar enzimas, prevenir reacciones de oxidación y acelerar el secado. Se separaron pequeños trozos de brócoli y se sometieron a diferentes pretratamientos: control, agua en ebullición, vapor y microondas, antes de proceder al secado convectivo (Orellana & Ortega, 2024).

2.2.1.2.1. Control

Se procesaron 100 gramos de material, los cuales fueron sometidos directamente al proceso de secado con el propósito de contar con una muestra control.

2.2.1.2.2. Agua en ebullición

La muestra de 100 gramos fue sumergida en 500 ml de agua en ebullición durante un periodo de 5 minutos. Posteriormente, se dejaron enfriar.

2.2.1.2.3. Vapor

Las muestras fueron sometidas a un proceso de cocción en vapor durante 5 minutos. Posteriormente, se dejaron enfriar.

2.2.1.2.4. Microondas

Debido a que esta metodología es más agresiva en comparación con las otras dos seleccionadas, se llevó a cabo en un tiempo más reducido. Las muestras se trataron a una potencia de 750 W durante 30 segundos, luego se enfriaron para sus posteriores análisis.

2.2.1.3. Secado y elaboración de harina

Se secó en una cámara de secado convectivo (Grander MTN, modelo CD 160, Saint Paul, MN, USA) a 65 °C durante 8 horas con una velocidad de aire de 2 m/s. Posteriormente, se procedió a su molienda para obtener harina, utilizando un molino eléctrico (Hamilton Beach, modelo 80,393, Picton, Canadá) en tres intervalos de 10 segundos, siguiendo el protocolo descrito por **Acurio et al. (2024)**. Como parte del objetivo de esta investigación incluye la construcción de la curva de secado, se pesaron las muestras cada 10 minutos durante las primeras 2 horas y cada 30 minutos en las horas restantes del tratamiento, con el fin de tener precisión en los datos.

2.2.1.4. Determinación de humedad

Se determinó mediante el método gravimétrico 925.10 (**AOAC, 1990**). Se utilizó una estufa de aire forzado a 105 °C y la humedad se calculó utilizando la Ecuación 1.

$$\%H = \frac{P_i - P_f}{P_m} \times 100 \quad [\text{Ec.1}]$$

P_i = Peso cápsula con muestra sin secar (g)

P_f = Peso cápsula con muestra seca (g)

P_m = Peso muestra (g)

2.2.2. Correlacionar los datos de la curva de cinética de secado con modelos matemáticos

2.2.2.1. Modelo matemático de la cinética de secado

Para determinar la velocidad de pérdida de agua en cada una de las muestras (laminas crudas, cocidas en agua, al vapor y tratadas en microondas), los datos obtenidos fueron ajustados a los modelos matemáticos descritos por **Acurio et al. (2023)**, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Principales modelos de la cinética de secado para una mejor precisión

Modelo	Ecuación	Nº
Newton	$MR = e^{-kt}$	[Ec.2]
Page	$MR = e^{-kt^n}$	[Ec.3]
Page modificado	$MR = e^{-(kt)^n}$	[Ec.4]
Henderson y Pabis	$MR = a \times e^{-kt}$	[Ec.5]
Logarítmica	$MR = ae^{-kt} + c$	[Ec.6]
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[Ec.7]
Fick	$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left(-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 \times L^2} \times t \right)$	[Ec.8]

Nota: Donde a y c : son constantes propias de los modelos, k : constante de velocidad de secado $\left[\frac{1}{min} \right]$, t : tiempo de secado $[min]$ y n : exponente de secado (número entero positivo).

En estos modelos la relación de humedad o ratio MR, se determina mediante la Ecuación 9.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad [\text{Ec.9}]$$

Donde:

MR : ratio de humedad

M_t : contenido de humedad a cualquier tiempo $\left[\frac{Kg_{agua}}{Kg_{b.s.}} \right]$

M_e : contenido de humedad en equilibrio $\left[\frac{Kg_{agua}}{Kg_{b.s.}} \right]$

M_i : contenido de humedad inicial $\left[\frac{Kg_{agua}}{Kg_{b.s.}} \right]$

2.2.2.2. Análisis Estadístico

La precisión y eficacia de los modelos matemáticos empleados para describir la cinética de secado se evaluaron mediante la estimación de diversos indicadores estadísticos, incluyendo el coeficiente de determinación (r^2), el error cuadrático medio (RMSE) y la desviación porcentual relativa media (MRPD) (Mostafaei et al., 2016). Los valores de estos parámetros se determinaron utilizando las ecuaciones que se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros para el describir la cinética de secado

Parámetro	Ecuación	Nº
Coeficiente de determinación	$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$	[Ec.10]
Error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_i - Y_i)^2 \right)}$	[Ec.11]
Desviación porcentual media	$MRPD = 100 \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \left \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right $	[Ec.12]

Nota: Donde n : número de observaciones, X_i : valor experimental, Y_i : valor previsto, $\bar{X}$: valor medio experimental y $\bar{Y}$: valor medio previsto

2.2.3. Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la harina

2.2.3.1. Determinación de pH y °Brix

Se pesaron aproximadamente 10 gramos de harina, a los que se añadirá agua destilada. La mezcla fue homogeneizada utilizando una Thermomix (TM 21, Vorwerk, Valencia, España) durante 30 segundos a una velocidad de 5200 rpm. El pH se midió con un pH-metro Basic 20 (Crison, España), mientras que los °Brix se cuantificaron mediante un refractómetro (Abbemat 200, Anton Paar, Austria) a una temperatura de 20 °C, por triplicado.

2.2.3.2. Acidez

La acidez titulable se determinó siguiendo la normativa **NTE INEN 521 (2013)**. Para ello, se pesaron 5 gramos de harina en un frasco de vidrio, a los que se añadieron 10 ml de agua destilada y se homogenizaron. Posteriormente, se incorporaron 90 ml adicionales de agua destilada a 45 °C. A la mezcla resultante se le añadió fenolftaleína como indicador y se procedió a titularla utilizando una solución de hidróxido de sodio 0,02 N.

2.2.3.3. Contenido de agua (x_w) y actividad del agua (a_w)

El contenido de humedad se determinó mediante el método gravimétrico 925.10 (**AOAC, 1990**). La actividad de agua (a_w) se determinó utilizando un higrómetro AquaLab PRE (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EE. UU.) (**Uribe et al., 2020**). Las mediciones se las realizó por triplicado con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

2.2.4. Diseño experimental

Se implementó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de múltiples rangos Tukey para evaluar el efecto de los diferentes pre-tratamientos aplicados sobre las propiedades fisicoquímicas en la harina obtenida. Las variables para considerar se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4.

Variables para evaluar el efecto de los pretratamientos y parámetros aplicados.

Variables independientes	Variable dependiente
Pre-tratamientos	Parámetros
	Pendiente (m_1) primera fase de la cinética de secado
	Pendiente (m_2) segunda fase de la cinética de secado
Control	pH
Agua en ebullición	°Brix
Microondas	Acidez
Vapor	Contenido de agua (x_w)
	Actividad del agua (a_w)

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

3.1.1. Humedad y actividad de agua (a_w) de los residuos de brócoli sometidos a diferentes pretratamientos

La Tabla 5 se presenta los valores de humedad y actividad de agua (a_w) de los residuos de brócoli, tanto en estado fresco (post pretratamiento) como en su forma final (harina). Se observa una reducción significativa en ambos parámetros tras el proceso de secado convectivo, lo que es consistente con lo esperado.

En cuanto a la humedad, los residuos frescos presentaron valores entre 84,4-86,4 %, coincidiendo con los rangos reportados por **Mahn et al. (2017)**, quienes afirman que los residuos de brócoli poseen una humedad inicial del 86-90 %, lo que limita su vida útil y favorece su descomposición microbiana. Después del secado, los niveles disminuyeron a valores entre 5,3 % y 8,4 %. El tratamiento con vapor (5,71 %) y con agua en ebullición (5,33 %) mostraron una mayor eficiencia en la eliminación de humedad frente al pretratado con microondas (8,38 %), lo cual se relaciona con la porosidad inducida y el colapso estructural generado por la micro-cocción, lo que dificulta la evaporación interna (**Zhang et al, 2023**).

Con respecto a la actividad de agua, todos los tratamientos permitieron reducirla a valores inferiores a 0,40, muy por debajo del límite crítico de 0,6 que permite el desarrollo microbiológico, según lo estipulado por **Vesterlund et al. (2012)**. Los tratamientos con agua en ebullición y vapor fueron los más eficientes, alcanzando una a_w final de 0,33. Este comportamiento se asocia a la capacidad del agua para modificar la microestructura sin dañar severamente la matriz celular, reduciendo así los sitios disponibles para la retención de agua libre (**Reyes et al., 2012**). Resultados que se alinean con los obtenidos por **Campas et al. (2009)**, quienes señalaron que el secado controlado, combinado con pretratamientos térmicos suaves, preserva tanto la calidad como la seguridad microbiológica de subproductos vegetales.

Así, el control efectivo de la humedad y a_w logrado en esta investigación garantiza la estabilidad de las harinas vegetales obtenidas, haciéndolas adecuadas para formulaciones funcionales y seguras en productos alimentarios.

Tabla 5.

Humedad y actividad de agua (a_w) de los residuos de brócoli antes y después del secado.

Tratamientos	Humedad [%]		Actividad de agua	
	Fresco	Harina	Fresco	Harina
Control	86,43 $\pm$ 1,41 ^{Aa}	6,49 $\pm$ 0,92 ^{Ba}	0,984 $\pm$ 0,002 ^{Abc}	0,48 $\pm$ 0,02 ^{Ba}
Agua	86,03 $\pm$ 1,34 ^{Aa}	5,33 $\pm$ 0,93 ^{Ba}	0,994 $\pm$ 0,002 ^{Aa}	0,33 $\pm$ 0,001 ^{Bb}
Vapor	85,57 $\pm$ 1,36 ^{Aa}	5,71 $\pm$ 0,26 ^{Ba}	0,986 $\pm$ 0,002 ^{Ac}	0,33 $\pm$ 0,007 ^{Bb}
Microondas	84,44 $\pm$ 1,10 ^{Aa}	8,37 $\pm$ 0,86 ^{Ba}	0,9824 $\pm$ 0,0008 ^{Aab}	0,36 $\pm$ 0,01 ^{Bb}

Diferentes letras mayúsculas en las filas representan diferencias significativas ($p < 0,05$) en el estado (fresco y harina), y letras minúsculas en las columnas representan diferencias significativas ($p < 0,05$) por pre-tratamientos (control, ebullición, vapor, microondas).

3.1.2. Curvas de cinética de secado de los residuos de brócoli

En la Figura 2 se presentan las curvas de la cinética de secado de los residuos de brócoli sometidos a diferentes pretratamientos térmicos (control, agua, vapor y microondas), mostrando la relación entre la ratio MR y el tiempo de secado. Las pendientes y trayectorias de estas curvas permiten caracterizar la velocidad y la eficiencia del secado en cada tratamiento.

Se observa que las muestras sometidas a agua en ebullición presentan una mayor pendiente en la primera fase de la cinética, indicando una rápida pérdida de humedad inicial. Este comportamiento puede atribuirse a la ruptura de estructuras celulares durante la cocción, lo cual facilita la migración del agua hacia la superficie del producto. Este fenómeno coincide con lo reportado por **Zang (2015)**, quien describe que la mayor parte del agua libre se elimina en esta etapa, y que los materiales porosos como el brócoli favorecen dicha transferencia rápida.

En contraste, las muestras tratadas con vapor muestran una curva más gradual en la fase inicial, indicando una menor velocidad de evaporación. Esto sugiere que, si bien el vapor no degrada tanto la estructura celular, sí modifica internamente la matriz vegetal y mejora su estabilidad para el secado posterior. Estos resultados se respaldan con el estudio reportado por **Reyes et al. (2012)**, quienes demostraron que el vapor promueve un secado progresivo sin comprometer la estructura interna del alimento. Por otro lado, el tratamiento con microondas muestra una cinética de secado con un descenso más sostenido, pero con menor pendiente que los otros tratamientos, lo que indica una liberación de agua más lenta en ambas fases. Este resultado sugiere un comportamiento térmico particular inducido por el calentamiento volumétrico, que puede provocar zonas endurecidas donde se atrapa la humedad (**Jin et al., 2014**).

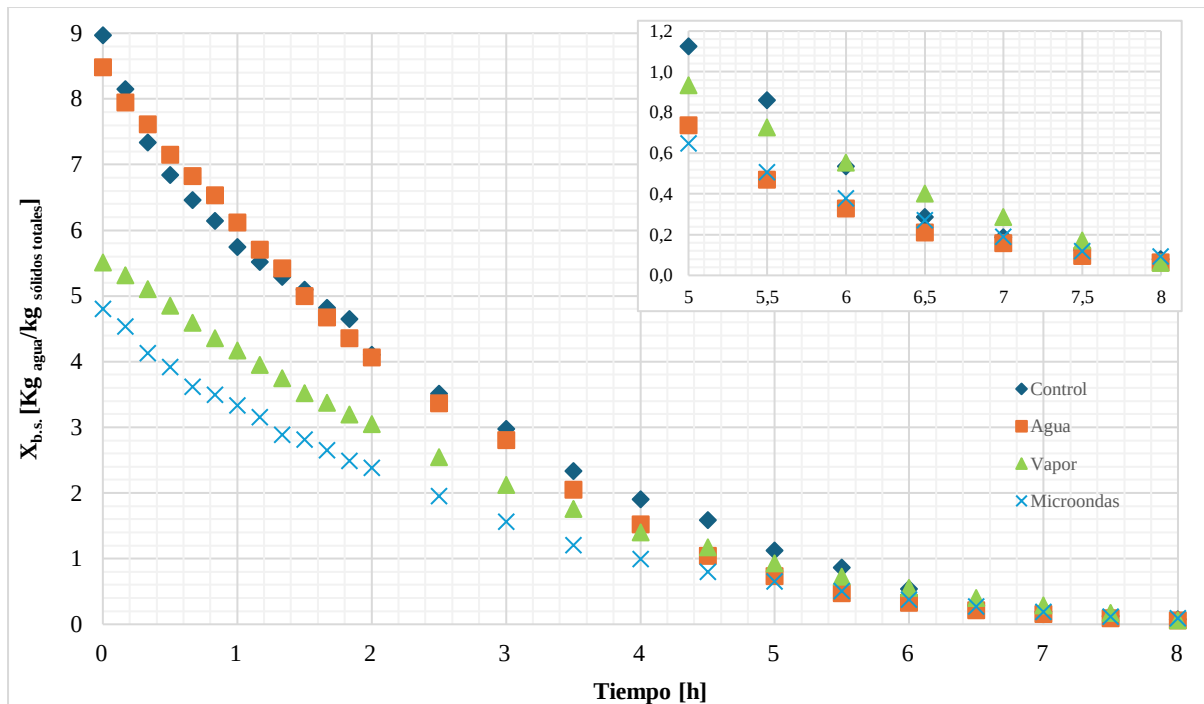


Figura 2. Curvas de la cinética de secado de las muestras aplicadas con los distintos pretratamientos.

La Figura 3 muestra el comportamiento independiente de cada pretratamiento. Se evidencia que todas las curvas presentan dos fases bien diferenciadas: una inicial con una pendiente más pronunciada (A-B) y una segunda con una pendiente que tiende a ser constante (B-C), lo que confirma el patrón de secado típico de materiales vegetales.

La muestra control evidenció una mayor resistencia al secado debido principalmente a la falta de ruptura de paredes celulares. Esta observación es similar con los resultados reportados por **Mahn et al. (2017)**, quienes establecieron que la duración del periodo de velocidad de secado constante disminuye significativamente al aplicar pretratamientos con calor.

Mientras que las muestras pretratadas con vapor y microondas empiezan el proceso de secado con una humedad inferior y, por ende, presentan pendientes inferiores en el primer tramo A-B. Si el secado fuese reducido a un tiempo de 5 h, la muestra que alcanzaría una menor humedad sería la pretratada con microondas, debido a que este proceso produce una ligera disminución de la humedad durante el calentamiento.

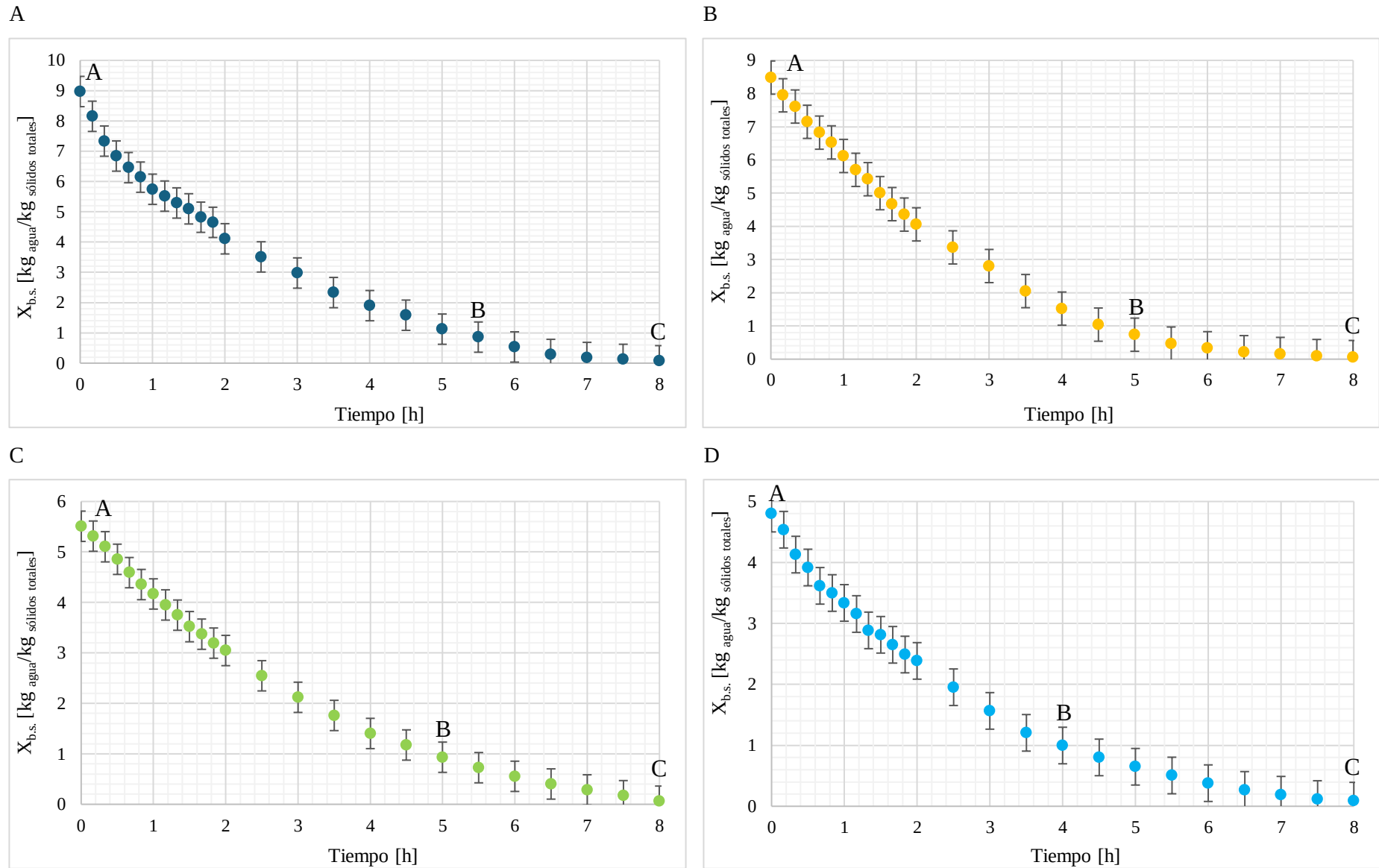


Figura 3. Curvas experimentales a diferentes pre-tratamientos.

Nota: (A) Muestra control, (B) Precocida en agua, (C) Precocido en vapor y (D) Precocido en microondas

En la Tabla 6 se muestran tres aspectos claves del proceso de secado de los residuos de brócoli: la humedad en el punto B (es decir, al final de la etapa de secado rápido), las tasas de pérdida de humedad en las etapas A-B y B-C, y el tiempo óptimo de secado requerido para alcanzar una humedad crítica de $0,15 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$ (NTE INEN 616, 2015).

En la tasa de pérdida de humedad en la fase A-B, que representa la fase inicial del secado, la muestra cocida en agua obtuvo la mayor tasa ($1,57 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}$), superando al control ($1,44 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}$). Estos resultados sugieren que los pretratamientos con agua favorecen una salida rápida de humedad libre, tal como lo indican **Dziki et al. (2020)**, quienes demostraron que el escaldado térmico favorece la desnaturalización de membranas, facilitando la evaporación inicial. Por otra parte, los tratamientos con vapor y microondas presentaron menores tasas en esta etapa, posiblemente por una menor disrupción inicial o por un endurecimiento parcial de la superficie que limita la evaporación temprana. **Jin et al. (2014)**, mencionan sobre este efecto en muestras tratadas con microondas, donde se forman zonas sobrecalentadas que dificultan la pérdida uniforme de humedad.

Durante la segunda fase (B-C), correspondiente al secado lento o de difusión interna, la muestra control nuevamente mostró la tasa más alta, mientras que microondas presentó la tasa más baja. Esta diferencia se relaciona con la integridad estructural interna; en las muestras sin pretratamiento, la matriz vegetal mantiene rutas abiertas que permiten la migración del agua ligada, mientras que, en microondas el colapso celular restringe la movilidad del agua remanente, reduciendo la eficiencia en esta etapa. Este patrón ha sido señalado también por **Campas et al. (2009)**, al analizar estructuras de brócoli tratadas térmicamente.

El análisis del secado óptimo revela que el tratamiento más eficiente fue agua en ebullición (7,05 h), seguido de microondas (7,28 h). Si bien la diferencia no es drástica, los resultados muestran que estos pretratamientos mejoran la velocidad global del secado.

Tabla 6.
Tiempo de secado óptimo y tasas de pérdida de humedad

Muestra	Humedad en el punto B $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{sólido seco}}} \right]$	Tasa de pérdida de humedad (A-B) $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}} \right]$	Tasa de pérdida de humedad (B-C) $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}} \right]$	Tiempo de secado óptimo [h] al alcanzar $0,15 \left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}}} \right]$
Control	1,12	1,44	0,35	7,30
Agua	0,74	1,57	0,21	7,05
Vapor	0,93	0,94	0,29	7,59
Microondas	0,65	0,82	0,19	7,28

3.1.3. Curvas de velocidad de secado

La Figura 4 muestra las curvas de velocidad de secado correspondientes a los distintos pretratamientos térmicos aplicados a los residuos de brócoli. En términos generales, estas curvas presentan un comportamiento típico de secado en materiales vegetales, donde predomina la fase de velocidad decreciente, característica de productos porosos con limitada humedad superficial libre.

En la Tabla 7 se detallan los aspectos de: humedad crítica, humedad de equilibrio, las cuatro etapas de pérdida de humedad (A-B, B-C, C-D y D-E), y la velocidad de secado y el tiempo de cada etapa. En la muestra control se observa una tasa de pérdida de humedad inicial de $2,19 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}$, la que desciende progresivamente hasta un valor de $0,5981 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$ en la última etapa D-E, con un tiempo total de secado de 8 horas. Este comportamiento es similar con lo reportado por **Wang et al. (2020)**, quienes documentan que el brócoli deshidratado a temperaturas moderadas exhibe una marcada fase de velocidad decreciente debido a la resistencia difusional interna del tejido vegetal.

En la muestra tratada con agua en ebullición se aprecia una mayor eficiencia en la velocidad de secado en las primeras fases. La etapa A-B alcanza una velocidad de secado de $10,89 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$ y se mantiene elevada en la fase B-C ($9,14 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$). Esto puede atribuirse a la disrupción celular causada por la ebullición, que facilita la liberación de agua libre. **Mahn et al. (2017)**, mencionan que el escaldado mejora la permeabilidad celular, lo que favorece la migración del agua durante el secado.

El tratamiento con vapor mostró un comportamiento intermedio. Aunque en la primera etapa la velocidad fue menor ($6,32 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$), se mantuvo relativamente constante hasta la fase C-D, con velocidades superiores a $4,8 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$. Este patrón puede estar asociado a una preservación estructural mayor en comparación con la ebullición, como también lo señala **Reyes et al. (2012)**, quienes observaron que el vapor mantiene la integridad de la matriz celular.

En el caso del tratamiento con microondas, la curva presenta un descenso más pronunciado en la velocidad de secado. La etapa A-B inicia con $4,83 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$, y decrece hasta $0,80 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{h}$, en la última etapa (D-E). A pesar de que este tratamiento se relacione con una mayor porosidad y pérdida celular inicial, también genera zonas sobrecalentadas que podrían haber colapsado canales de difusión, dificultando la evaporación interna (**Jin et al., 2014**).

Tabla 7.

Humedad crítica y de equilibrio, etapas de pérdida de humedad, velocidad de secado y tiempo.

Muestra	x_c $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}}} \right]$	x_e $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}}} \right]$	Etapas	Pérdida de humedad $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}}} \right]$	Velocidad de secado $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{h} \times \text{m}^2} \right]$	Tiempo [h]
Control	4,11	0,08	A-B	2,1903	3,5029	0,67
			B-C	2,6742	2,3383	1,33
			C-D	3,2099	1,3405	3,50
			D-E	0,8187	0,5981	2,50
Agua	5,00	0,06	A-B	1,3326	10,8949	0,50
			B-C	2,1484	9,1407	1,00
			C-D	2,1952	7,2719	1,50
			D-E	2,7427	2,4556	5,00
Vapor	3,95	0,06	A-B	0,6548	6,3295	0,50
			B-C	0,9044	6,6862	0,67
			C-D	2,5471	4,8393	2,83
			D-E	1,3419	1,8248	4,00
Microondas	2,65	0,09	A-B	0,8833	4,8398	0,50
			B-C	1,2682	3,0405	1,17
			C-D	1,4444	2,2514	1,83
			D-E	1,1122	0,8067	4,50

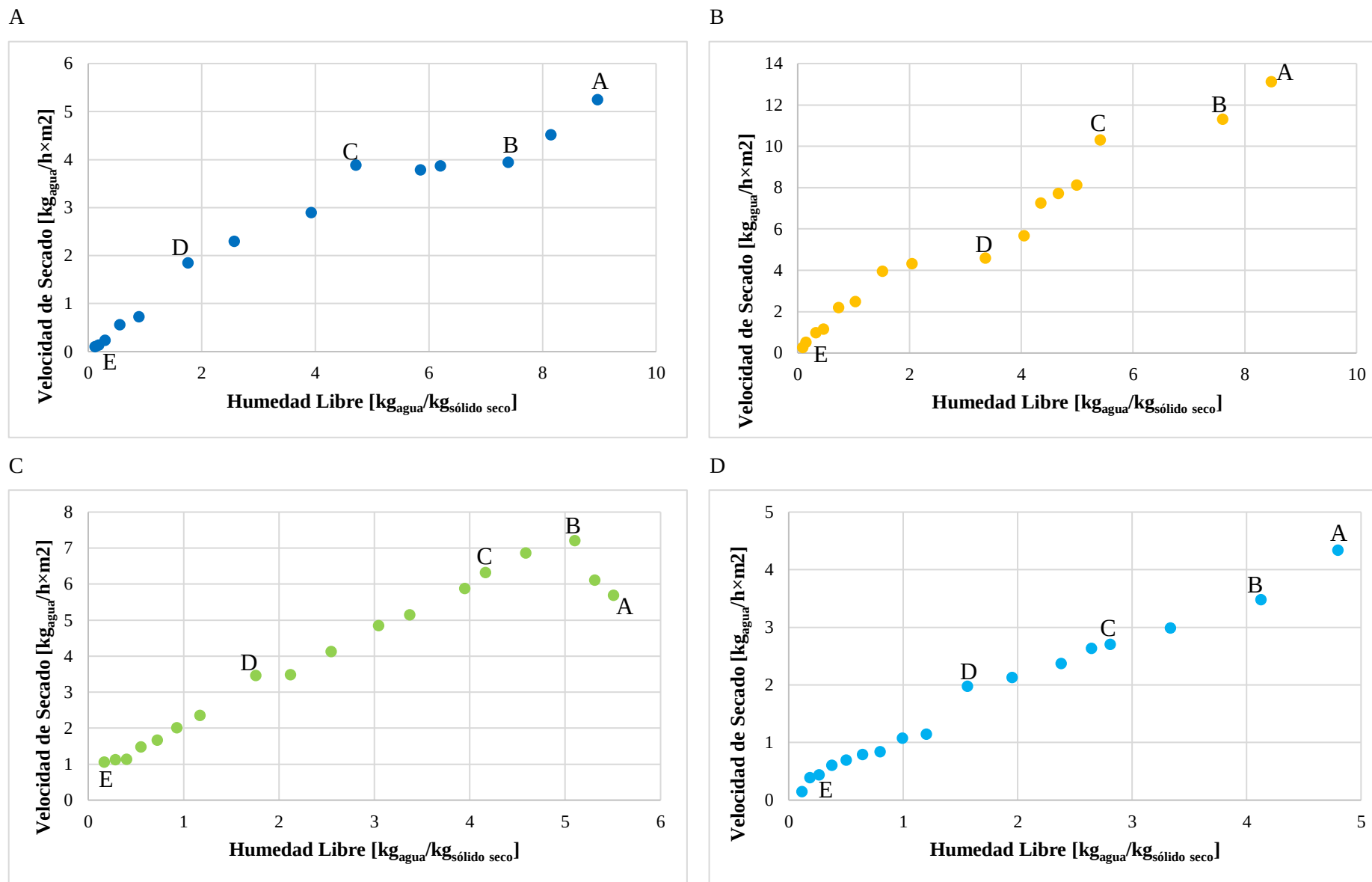


Figura 4. Curvas de velocidad de secado a diferentes pre-tratamientos.

Nota: (A) Muestra control, (B) Precocida en agua, (C) Precocido en vapor y (D) Precocido en microondas

3.1.4. Modelados matemáticos de la cinética de secado

En la Tabla 8 se reportan los resultados de los ajustes de los datos experimentales a los modelos matemáticos reportados en la Tabla 2. En la mayoría de las muestras el modelo que presentó un mejor ajuste fue el Logarítmico, que presentó valores altos en el coeficiente de determinación (R^2). Además de presentar los valores más bajos de RMSE y MRPD, lo que indica un ajuste altamente confiable entre los datos experimentales y los predichos, resultados que se asemejan con estudios que destacan la eficiencia en matrices vegetales (**Doymaz, 2014; Mahn et al., 2016**).

Este efecto ha sido observado en otros estudios. Por ejemplo, en el estudio reportado por **Mahn et al. (2017)**, se ajustaron curvas de secado de brócoli triturado a estos modelos empíricos, observándose que todos ofrecieron un coeficiente de determinación (R^2) superiores al 95 %, aunque el modelo de Page fue el que mostró los mejores resultados con $R^2 \geq 99 \%$, lo que lo convierte en una herramienta robusta para simular procesos reales de secado. También mostró buen desempeño, siendo una opción estable para describir la cinética de secado, especialmente cuando se aplican pretratamientos térmicos.

El ajuste obtenido en este estudio ha sido consistente con estudios previos realizados por **Acurio et al. (2023)** y **Kumar et al. (2017)**, quienes también observaron que el modelo Logarítmico se adapta mejor a matrices vegetales complejas debido a su capacidad para capturar la no linealidad del secado durante las fases iniciales y tardías, con valores de R^2 superiores al 99,5 % y errores estándar bajos ($RMSE < 0,03$). Así mismo, esta tendencia se ha documentado también en el secado de brócoli liofilizado y otros vegetales por **Doymaz (2014)** y **Mahn et al. (2016)**, quienes indicaron que este modelo captura adecuadamente los cambios de fase en el secado convectivo.

Cabe mencionar que la elección del modelo adecuado también depende de factores como el tipo de pretratamiento aplicado, la temperatura y el espesor del producto. Por ejemplo, al aumentar la temperatura de secado, el parámetro de velocidad (k) incrementa proporcionalmente, como se observó en los modelos de Page y Henderson-Pabis. Esto refleja un mayor coeficiente de transferencia de masa, alineándose con el comportamiento típico de productos porosos como el brócoli.

Tabla 8.

Velocidad de pérdida de agua en el modelado de la cinética de secado

Modelado	Variable	Control	Agua	Vapor	Microondas
Newton	$k [h^{-1}]$	0,5264	0,5731	0,4115	0,5017
	R^2	0,9893	0,9842	0,9869	0,9937
	RMSE	0,0315	0,0420	0,0374	0,0252
	MRPD	0,0277	0,0384	0,0340	0,0217
Page	$k [h^{-1}]$	0,4621	0,3672	0,2840	0,3950
	n	0,9817	1,1869	1,1863	1,0815
	R^2	0,9885	0,9968	0,9980	0,9955
	RMSE	0,0326	0,0188	0,0147	0,0213
	MRPD	0,0279	0,0158	0,0122	0,0166
Page Modificado	$k [h^{-1}]$	0,4555	0,4300	0,3461	0,4236
	n	0,9817	1,1869	1,1863	1,0815
	R^2	0,9868	0,9959	0,9972	0,9950
	RMSE	0,0302	0,0186	0,0151	0,0194
	MRPD	0,0263	0,0164	0,0127	0,0153
Henderson y Pabis	a	1,2795	1,4854	1,2432	1,2463
	$k [h^{-1}]$	0,4942	0,5681	0,3971	0,4645
	R^2	0,9869	0,9851	0,9895	0,9914
	RMSE	0,0301	0,0355	0,0295	0,0254
	MRPD	0,0265	0,0330	0,0248	0,0219
Logarítmico	a	1,0380	1,1319	1,1599	1,0736
	$k [h^{-1}]$	0,3024	0,3414	0,2711	0,3318
	c	0,1071	0,1024	0,1359	0,0849
	R^2	0,9971	0,9965	0,9997	0,9988
	RMSE	0,0141	0,0173	0,0049	0,0097
	MRPD	0,0107	0,0153	0,0037	0,0071
Wang y Singh	a	0,3029	0,2961	0,2245	0,2686
	b	0,0232	0,0219	0,0130	0,0190
	R^2	0,9720	0,9977	0,9979	0,9881
	RMSE	0,0439	0,0140	0,0132	0,0299
	MRPD	0,0343	0,0113	0,0116	0,0256

Donde k , n , a , b y c son las constantes de secado, R^2 es el coeficiente de determinación, RMSE es el error cuadrático medio y MRPD es la desviación porcentual media.

Los resultados obtenidos indican que los valores del coeficiente de difusión del agua (D_{eff}) aumentaron de forma significativa con el pretratamiento por microondas, seguido por las muestras tratadas con vapor, como se detallan en la Tabla 9. Este comportamiento puede explicarse por el grado de alteración estructural de los tejidos vegetales inducido por cada pretratamiento. En el tratamiento con microondas, la generación de calor volumétrico provoca la ruptura celular y la formación de canales internos que facilitan la difusión de la humedad (Pérez et al., 2014).

En el contexto de productos similares, se ha reportado que el D_{eff} en brócoli oscila típicamente entre $2,00 \times 10^{-10}$ y $2,82 \times 10^{-9}$ m²/s en floretes frescos (Mahn et al., 2011), aumentando a valores de hasta $4,9 \times 10^{-9}$ m²/s en condiciones de secado optimizadas (Reyes et al., 2012) o incluso a $3,56 \times 10^{-8}$ m²/s en investigaciones con temperaturas elevadas y pretratamientos intensivos (Doymaz, 2014).

Según evidencia científica, este parámetro muestra influencia también de la temperatura, pues se ha demostrado que aumentar de 60 °C a 70 °C incrementa significativamente los valores de D_{eff} debido a la mayor energía disponible para la movilidad molecular del agua (Maldonado, R., & Pacheco, E., 2003).

Tabla 9.
Coeficiente de difusión del agua aplicada en los pretratamientos

Muestra	$D_{eff} \left[\frac{m^2}{s} \right]$
Control	$8,64 \times 10^{-10}$
Agua	$9,74 \times 10^{-10}$
Vapor	$6,77 \times 10^{-10}$
Microondas	$8,22 \times 10^{-10}$

3.1.5. Propiedades fisicoquímicas de la harina de residuos de brócoli

La prueba de Tukey muestra cómo los diferentes pretratamientos térmicos aplicados a los residuos de brócoli influyeron significativamente sobre las propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida. Los parámetros evaluados fueron: humedad, actividad de agua (a_w), pH, sólidos solubles totales (°Brix) y acidez titulable. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 10.

En cuanto a la humedad, la harina elaborada con el pretratamiento microondas y la harina control obtuvieron los valores más altos (8,37 y 6,49 %, respectivamente). Esto implica que los tratamientos tradicionales (agua y vapor) logran un secado más eficiente. Resultados similares se reportan en **Mahn et al. (2011)**, donde se demuestra que la ebullición facilita la liberación de agua por ruptura celular.

En cuanto a la actividad de agua, el valor más bajo lo presentaron las muestras tratadas con vapor (0,30), mientras que el valor más alto se observó en las muestras tratadas con agua en ebullición (0,38). Esto confirma que el vapor proporciona mayor estabilidad microbiológica por su efecto sobre la estructura celular (**Reyes et al., 2012**).

La evaluación de pH evidenció que el tratamiento con microondas (6,6367) presentó el valor más bajo y fue estadísticamente diferente a todas las demás muestras. Mientras que las muestras control y la sometida a agua en ebullición no mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$). Este descenso en el pH puede explicarse por la formación de compuestos ácidos derivados del calor (**Alibas, 2007**).

En cuanto a los sólidos solubles se observó un incremento en la muestra tratada con microondas (4,57 °Brix), lo que indica que este pretratamiento genera un efecto diferenciado debido a la ruptura celular y la evaporación de agua que concentra azúcares y solutos (**Campas et al., 2009**).

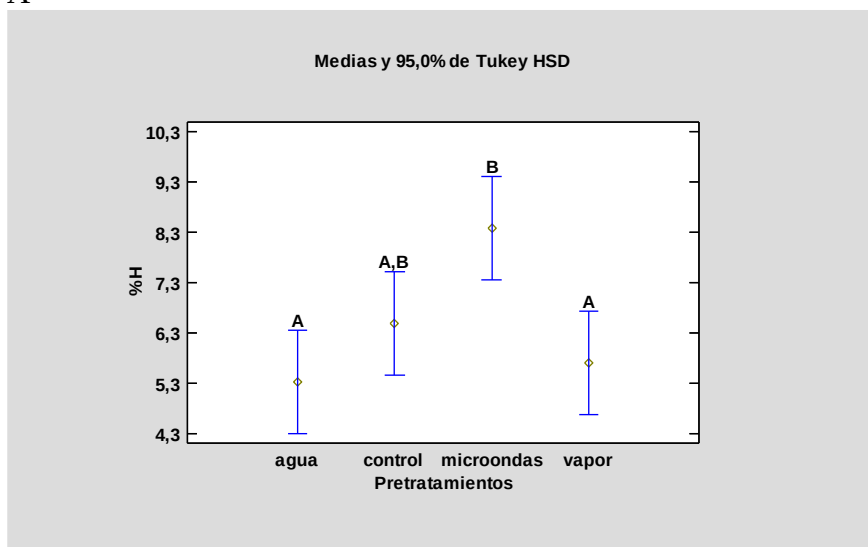
Finalmente, en la acidez se observa una degradación térmica de compuestos orgánicos, indicando que los tratamientos térmicos más intensos (vapor y microondas) generan mayor liberación o formación de ácidos, probablemente por oxidación térmica.

Tabla 10.

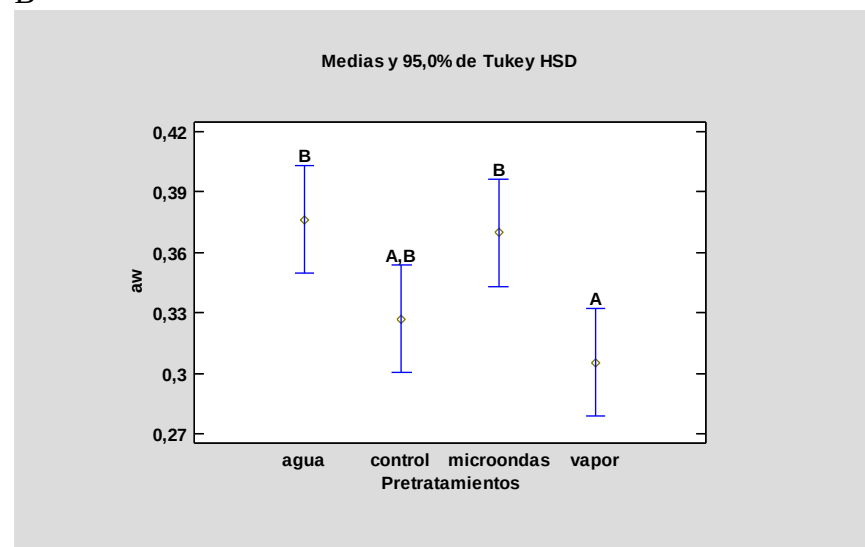
Propiedades fisicoquímicas de la harina de residuos de brócoli obtenida con los diferentes pretratamientos.

Pre-tratamientos	Control	Agua	Vapor	Microondas
Humedad [%]	6,4955 ± 0,9 ^A	5,3333 ± 0,9 ^A	5,7133 ± 0,3 ^{AB}	8,3767 ± 0,8 ^B
a_w	0,3271 ± 0,01 ^A	0,3764 ± 0,02 ^{AB}	0,3053 ± 0,03 ^B	0,3698 ± 0,01 ^B
pH	6,8727 ± 0,1 ^A	6,9703 ± 0,01 ^A	6,7167 ± 0,02 ^B	6,6367 ± 0,01 ^C
Brix	2,5800 ± 0,02 ^B	4,5733 ± 0,1 ^C	21,7667 ± 0,3 ^C	22,9200 ± 0,04 ^A
Acidez	0,9013 ± 0,004 ^A	0,5335 ± 0,03 ^B	1,0373 ± 0,002 ^C	1,4760 ± 0,004 ^D

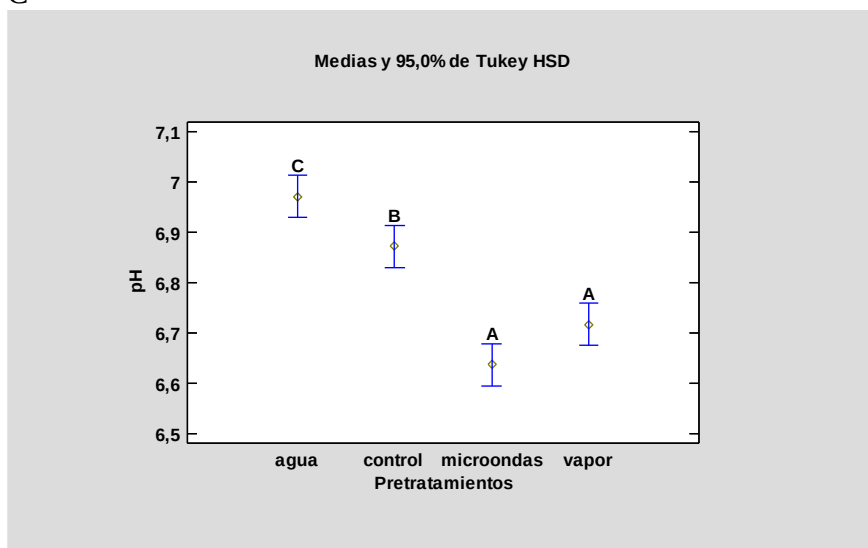
A



B



C



D

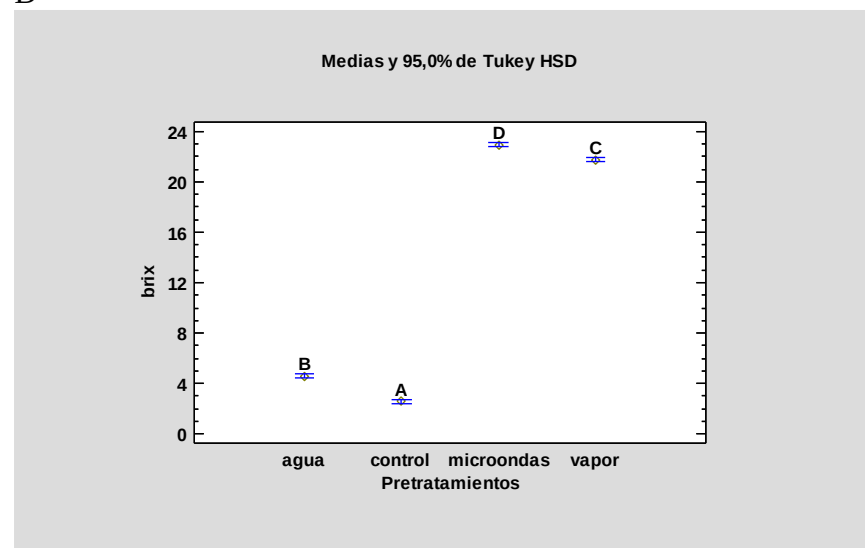


Figura 5. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD)

Nota: (A) Humedad, (B) Actividad de agua, (C) pH y (D) Brix

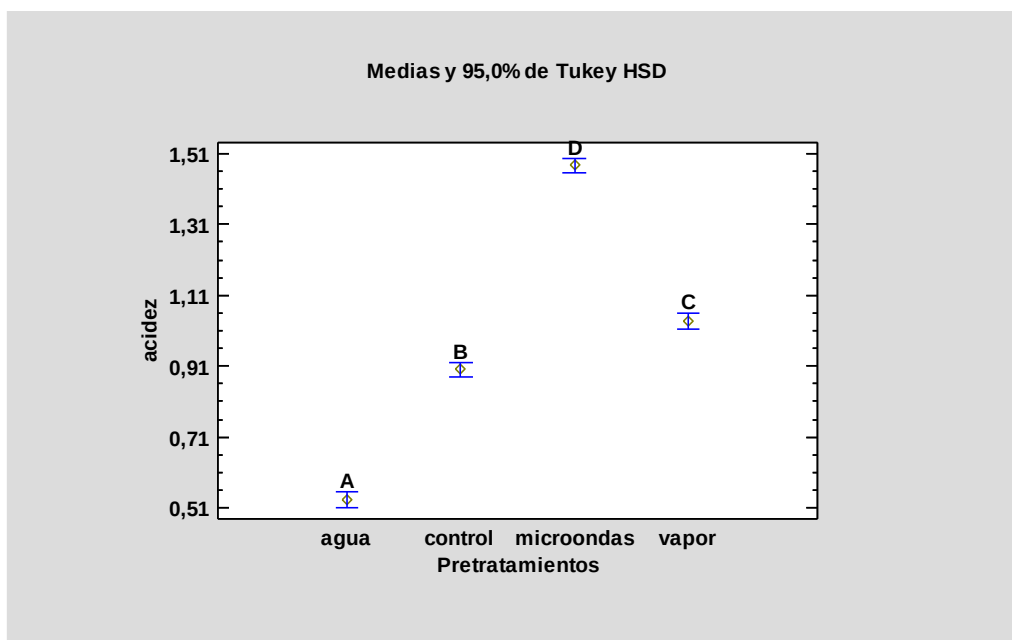


Figura 6. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD) de la acidez

Por otra parte, en la Tabla 11 se reporta el análisis estadístico realizado a las tasas de secado discutidas en el apartado 3.1.2 (curvas de cinética de secado de los residuos de brócoli), cuyos valores fueron detallados ampliamente en la Tabla 6.

En la primera fase del secado (m_1), las muestras control ($2,34 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}$) y pretratada con agua en ebullición ($2,09 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}$) mostraron pendientes significativamente mayores. Esto indica que, al inicio del secado, estas muestras liberan humedad con mayor rapidez. Este fenómeno se explica por la mayor disponibilidad de agua libre y la integridad estructural más permeable, como han descrito **Mahn et al. (2011)**, quienes señalan que el escaldado térmico y la ausencia de pretratamiento mantienen abiertas las rutas de migración del agua superficial.

En la segunda fase del secado (m_2), que representa la etapa de velocidad decreciente dominada por la difusión interna del agua ligada, se observa una tendencia similar. Las pendientes son más elevadas en la muestra control ($0,69 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}$) y en la muestra pretratada con agua en ebullición ($0,65 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}$). Esta disminución refleja una mayor resistencia al flujo interno de agua en muestras sometidas a tratamientos más intensos, como vapor y microondas. Tal comportamiento se ha documentado en estudios de **Jin et al. (2014)**, donde se observa que los gradientes térmicos generados por el microondas pueden colapsar parcialmente los tejidos, reduciendo la eficiencia del secado interno.

Tabla 11.

Prueba de múltiples rangos (Tukey HSD) de las pendientes de la cinética de secado.

Pre-tratamientos	Primera fase (m_1) $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}}\right]$	Segunda fase (m_2) $\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{ss}} \times \text{h}}\right]$
Control	$2,34 \pm 0,70^B$	$0,69 \pm 0,18^B$
Agua	$2,09 \pm 0,27^B$	$0,65 \pm 0,25^B$
Vapor	$1,24 \pm 0,15^A$	$0,48 \pm 0,12^A$
Microondas	$1,23 \pm 0,28^A$	$0,36 \pm 0,11^A$

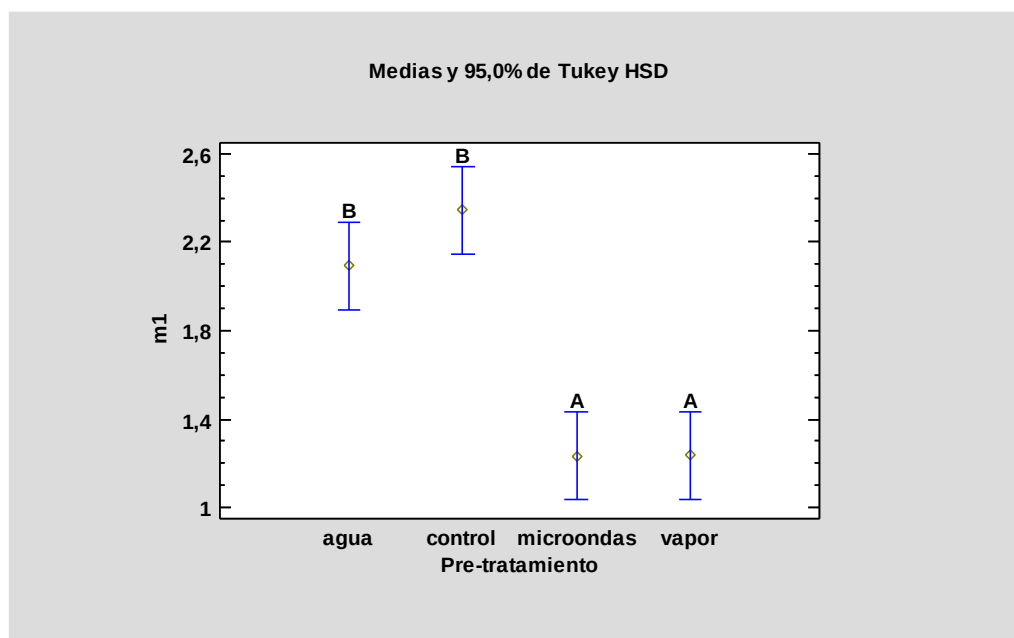


Figura 7. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD) de la primera fase de la cinética de secado

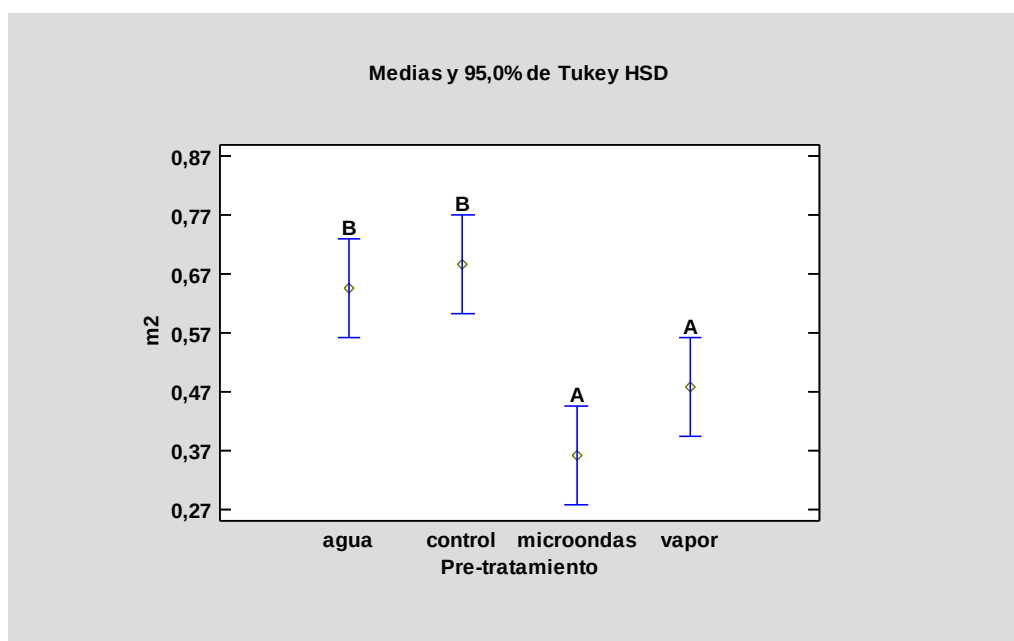


Figura 8. Gráfico de medias (múltiples rangos Tukey HSD) de la segunda fase de la cinética de secado

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las curvas de la cinética de secado evidenciaron que los residuos de brócoli presentan dos fases bien diferenciadas: una etapa inicial con mayor velocidad de pérdida de humedad, influenciada principalmente por el pretratamiento térmico, y una segunda fase más lenta, dominada por la difusión interna. La cocción en agua mostró la mayor pendiente en la fase inicial ($1,57 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\times\text{h}$), mientras que la muestra tratada con microondas presentó el valor menor ($0,82 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{ss}}\times\text{h}$), indicando una resistencia mayor al secado en la etapa superficial. Esto demuestra que los pretratamientos térmicos modifican significativamente la estructura del tejido vegetal, condicionando la eficiencia del proceso.
- La correlación de los datos experimentales con modelos matemáticos permitió determinar que el modelo Logarítmico fue el más adecuado para describir el comportamiento del secado, mostrando los mejores ajustes estadísticos ($R^2 \geq 0,99$). Los coeficientes de difusión efectivos (D_{eff}) variaron según el pretratamiento, siendo más altos en muestras tratadas con microondas y con agua en ebullición, lo cual indica una mejora en la facilidad de transferir agua desde la muestra hacia el aire caliente.
- Los tratamientos térmicos modificaron significativamente las propiedades fisicoquímicas de la harina. El pretratamiento realizado con vapor generó una menor actividad de agua, contribuyendo a su estabilidad microbiológica; mientras que el tratamiento con microondas produjo los mayores valores de acidez y °Brix. Finalmente, se evidenció que el tratamiento con vapor ofrece un balance óptimo entre eficiencia de secado y preservación de propiedades fisicoquímicas.

4.2.Recomendaciones

- Se recomienda el uso de pretratamiento con vapor para la producción de harina a partir de residuos de brócoli, ya que mostró una combinación favorable de eficiencia de secado, baja actividad de agua y propiedades fisicoquímicas estables, lo que facilita su conservación y potencial aplicación industrial.
- Para futuras investigaciones, se sugiere explorar otros métodos de pretratamiento como el ultrasonido o el pulso eléctrico, así como evaluar la estabilidad de las harinas durante el almacenamiento, especialmente en términos de actividad de agua y propiedades fisicoquímicas.
- Se recomienda la formulación de alimentos funcionales utilizando la harina de residuos de brócoli tratada con vapor, debido a que puede aportar beneficios nutricionales a diferentes matrices alimentarias como panificados o mezclas instantáneas.

BIBLIOGRAFÍA

- Acurio, L., Baquerizo, A., Borja, A., Vayas, M., García, P., Martínez, J., & Igual, M. (2023). *Water-Sorption Isotherms and Air-Drying-Kinetics Modelling of Andean Tubers and Tuberous Roots*. 71. <https://doi.org/10.3390/foods2023-15141>
- Acurio, L., Salazar, D., García, M. E., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., & Igual, M. (2024). Characterization, mathematical modeling of moisture sorption isotherms and bioactive compounds of Andean root flours. *Current Research in Food Science*, 8(April). <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100752>
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices. *Lwt*, 40(8), 1445–1451. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.09.002>
- Association of Official Analytical Chemists. (1990). *Official Methods of Analysis: Vol. Two* (Fifteenth). Journal of the Association of Official Agricultural Chemists.
- Bas, C. (2023). Desarrollo del proceso de obtención de polvos funcionales de uso alimentario a partir de residuos de las líneas de confección de hortalizas, caracterización funcional y evaluación de su respuesta a la digestión simulada in vitro. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=323608>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., & Seguí, L. (2024). Impact of Thermophysical and Biological Pretreatments on Antioxidant Properties and Phenolic Profile of Broccoli Stem Products. *Foods*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/foods13223585>
- Campas, O. N., Sanchez, D. I., Bueno, C., Núñez, J. A., Reyes, C., & López, J. (2009). Biochemical composition and physicochemical properties of broccoli flours. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 60(SUPPL.4), 163–173. <https://doi.org/10.1080/09637480802702015>
- Delgado, D. (2020). Elaboración de pasta alimenticia con sustitución parcial de harina de brócoli (*Brassica oleraceae* var. *italica*). *Nature Microbiology*, 3(1), 641. <http://dx.doi.org/10.1038/s41421-020-0164-0>
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.027>
<https://www.golder.com/insights/block-caving-a-viable-alternative/>
<http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-15507-2>
<http://dx.doi.org/10.1038/s41587-020-05>

- Domínguez, R., Martínez, M., Carvajal, M., García, C., & Moreno, D. A. (2010). Broccoli-derived by-products - a promising source of bioactive ingredients. *Journal of Food Science*, 75(4), 383–392. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01606.x>
- Doymaz, I. (2014). Effect of blanching temperature and dipping time on drying time of broccoli. *Food Science and Technology International*, 20(2), 149–157. <https://doi.org/10.1177/1082013213476075>
- Dziki, D., Habza-Kowalska, E., Gawlik-Dziki, U., Miś, A., Różyło, R., Krzysiak, Z., & Hassoon, W. H. (2020). Drying kinetics, grinding characteristics, and physicochemical properties of broccoli sprouts. *Processes*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.3390/pr8010097>
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- FAO. (2020). La medición de la pérdida y el desperdicio de alimentos en relación con la metodología de evaluación de las pérdidas de alimentos. *Conferencia Regional De La Fao Para Europa*, 32, 1–8.
- Jin, X., Oliviero, T., van der Sman, R. G. M., Verkerk, R., Dekker, M., & van Boxtel, A. J. B. (2014). Impact of different drying trajectories on degradation of nutritional compounds in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). *Lwt*, 59(1), 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.031>
- Krajewska, A., Dziki, D., Yilmaz, M. A., & Özdemir, F. A. (2024). Broccoli pomace: effect of drying methods and temperature on the grinding process and physicochemical properties. *International Agrophysics*, 38(4), 423–436. <https://doi.org/10.31545/intagr/192835>
- Kumar, S., Mahanand, S. S., & Kumar, P. (2017). Mathematical modelling and experimental analysis of broccoli (*Brassica oleracea* L.) in tray dryer. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 1049–1052.
- Le, J. (2009). El brócoli en Ecuador: la fiebre del oro verde. Cultivos no tradicionales, estrategias campesinas y globalización. *Anuario Americanista Europeo*, ISSN 1729-9004, Nº. 6-7, 2009 (Ejemplar Dedicado a: Las Nuevas Figuras Del Mundo Rural Latinoamericano / Coord. Por Jean-Christian Tulet), Págs. 261-288, 6, 261–288.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3404583&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3404583>

- Mahn, A., Pérez, C., & Reyes, A. (2017). Efecto de las Condiciones de Secado en Lecho Fluidizado Pulsante sobre el Contenido de Sulforafano de Brócoli. *Informacion Tecnologica*, 28(4), 17–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000400004>
- Mahn, A. V., Antoine, P., & Reyes, A. (2011). Optimization of drying kinetics and quality parameters of broccoli florets. *International Journal of Food Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.2181>
- Mahn, A. V., Román, J. I., & Reyes, A. E. (2016). Efecto de la liofilización de brócoli pre-procesado sobre la cinética de secado y el contenido de sulforafano. *Informacion Tecnologica*, 27(6), 95–106. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000600010>
- Maldonado, R., & Pacheco, E. (2003). Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleraceae* L var. *Italica* Plenck) y coliflor (*Brassica oleraceae* L var. *Botrytis* L). *Revista de la Facultad de Agronomía*, 20(3), 306-319. Recuperado en 12 de junio de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182003000300005&lng=es&tlng=es.
- Md Salim, N. S., Gariépy, Y., & Raghavan, V. (2017). Hot Air Drying and Microwave-Assisted Hot Air Drying of Broccoli Stalk Slices (*Brassica oleracea* L. Var. *Italica*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.12905>
- Moraflores, V. (2013). *Desarrollo y caracterización de la harina del tronco de brócoli (Brassica oleracea var. Italica) sometido a diferentes procesos de deshidratación*. 82, 2369.
- NTE INEN 521. (2013). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169 : 2013 Primera revisión. Inen, First Edit, 15. https://gestionambiental.pastaza.gob.ec/biblioteca/legislacion-ambiental/patrimonio_natural/nte_inen_2176_1_agua_ca
- NTE INEN 616. (2015). Harina de trigo. *Inen, Harina de Trigo. Requisitos*, 8. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/NTE_INEN_839.pdf

- Orellana, T., & Ortega, A. (2024). *Obtención de productos de valor añadido a partir de residuales de brócoli (Brassica oleracea L. var. Italica)*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/43677/1/Trabajo-de-Titulación.pdf>
- Pérez, C., Barrientos, H., Román, J., & Mahn, A. (2014). Optimization of a blanching step to maximize sulforaphane synthesis in broccoli florets. *Food Chemistry*, 145, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.053>
- Reyes, A., Mahn, A., Guzmán, C., & Antoniz, D. (2012). Analysis of the Drying of Broccoli Florets in a Fluidized Pulsed Bed. *Drying Technology*, 30(11–12), 1368–1376. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.686548>
- Salvador, R. (2022). *Efecto de las condiciones de procesado sobre la cinética de secado y las propiedades antioxidantes de tallos de brócoli*. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/188210>
- Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. *Trends in Food Science and Technology*, 62, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.003>
- Uribe, Z. N., Igual, M., García-Segovia, P., & Martínez-Monzó, J. (2020). Influence of microalgae addition in formulation on colour, texture, and extrusion parameters of corn snacks. *Food Science and Technology International*, 26(8), 685–695. <https://doi.org/10.1177/1082013220924178>
- Vázquez, C., Mejía, B., Robles, R., & Ramírez, C. (2020). Impacto de las tecnologías de procesamiento del brócoli sobre compuestos fitoquímicos relevantes en salud humana: una revisión. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 21, 3–10.
- Vesterlund, S., Salminen, K., & Salminen, S. (2012). Water activity in dry foods containing live probiotic bacteria should be carefully considered: A case study with *Lactobacillus rhamnosus* GG in flaxseed. *International Journal of Food Microbiology*, 157(2), 319–321. <https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2012.05.016>
- Wang, Z., Kwan, M. L., Pratt, R., Roh, J. M., Kushi, L. H., Danforth, K. N., Zhang, Y., Ambrosone, C. B., & Tang, L. (2020). Effects of cooking methods on total isothiocyanate

yield from cruciferous vegetables. *Food Science and Nutrition*, 8(10), 5673–5682.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.1836>

Zang, F. (2015). *Evaluation of Drying Behavior of Broccoli (Brassica oleracea L.) in Hot air and Microwave Drying Systems*. By. 1–111.
<http://search.proquest.com.ezaccess.library.uitm.edu.my/dissertations-theses/evaluation-drying-behavior-broccoli-em-brassica/docview/2519308888/se-2?accountid=42518>

Zhang, G., Yu, Y., Yao, C., Zhou, L., Zhu, G., Lai, Y., & Niu, P. (2024). Effect of Far-Infrared Drying on Broccoli Rhizomes: Drying Kinetics and Quality Evaluation. *Processes*, 12(8).
<https://doi.org/10.3390/pr12081674>