



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: Modelado de la cinética de secado de residuos de col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) sometidos a diferentes pretratamientos y de las isothermas de adsorción de agua de la harina obtenida

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: Dennis Andres Salan Morales

Tutor: Dra. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato - Ecuador

Enero - 2026

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, 12 de diciembre de 2025

Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

1804067088

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Dennis Andres Salan Morales, 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.



Dennis Andres Salan Morales

1850282177

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.



Dennis Andres Salan Morales

1850282177

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

Daniel Alberto Armas Real
1803542214

Juan de Dios Espinoza Moya
1803201431

Ambato, 05 de enero del 2026

DEDICATORIA

A mi yo del 2020,

A pesar de todo, lograste superar ese miedo; te has esforzado y, con ello, has obtenido grandes resultados; asimismo, a pesar de que siempre te encuentres con miedo ante lo que conocías, eso nunca te detuvo; lograste no solo superarte como persona, sino que también has sanado esa herida invisible que te perseguía. Nunca retrocediste a tu palabra, lograste mantenerte firme frente la adversidad a pesar del miedo, lágrimas y desesperación, no olvides:

Never give up (nunca te rindas)

—
A mis padres, hermana, mi mejor amiga y en especial a mi abuela,

Gracias por darme la oportunidad de demostrar que era mucho más de lo que los comentarios decían de mí. Gracias de todo corazón por apoyarme en cada detalle. Gracias por el tiempo, la paciencia y porque han creído en todo lo que hago. Ustedes me han motivado a no rendirme como profesional, gracias por sus ánimos en tiempos difíciles y por ayudarme a darle un nuevo enfoque a mi vida. Espero de igual forma haber influido en su vida, como ustedes lo han hecho.

Como Jesús lo mencionó: “Considérense dichosos cuando tengan que enfrentarse con diversas pruebas, pues ya saben que la prueba de su fe genera constancia y la constancia lleva al bien”.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios, por darme la sabiduría y perseverancia para no rendirme en tus pruebas que me ha dado y superarlas.

A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, por brindar el conocimiento, tiempo y espacio para desarrollar nuevas habilidades para mi formación profesional.

A mi directora de tesis, la Ph.D. Liliana Acurio, por su guía y apoyo incondicional durante todo este proceso. Su profesionalismo y conocimiento han sido fundamentales, pero, sobre todo, por su calidad humana.

A mis padres Patricio Salan y Anabel Morales, por brindarme su apoyo incondicional y dar la oportunidad para mi formación profesional.

A mi Abuelita Georgina Ponluisa, por siempre estar pendiente de mí durante toda mi etapa universitaria apoyando y motivando para no rendirme y siempre ser esa persona especial en mi vida

A todas las buenas personas que me han acompañado a lo largo de mi carrera, en especial a mi mejor amiga, que siempre ha estado acompañando y apoyando durante estos años.

A todos ustedes,

¡Gracias Totales!

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
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo General	8
1.2.2 Objetivos Específicos	8
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA.....	9
2.1 Materiales	9
2.2 Métodos.....	9
2.2.1 Construir la curva de cinética de secado de las láminas del residuo de la col (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Capitata</i> L.) sometida a diferentes pretratamientos	9
2.2.2 Correlacionar los datos de la cinética de secado con modelos matemáticos referenciales	
11	
2.2.3 Correlacionar los datos de las isotermas de adsorción de agua de la harina de las láminas de residuos de col (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Capitata</i> L.) con modelos matemáticos referenciales	12
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14

3.1	Análisis y discusión de los resultados	14
3.1.1	Humedad y actividad de agua de las láminas de col sometidas a diferentes pretratamientos	14
3.1.2	Curvas de cinética de secado	15
3.1.3	Curvas de velocidad de secado	18
3.1.4	Modelados matemáticos de la cinética de secado	21
3.1.5	Isotermas de adsorción	24
3.1.6	Modelado matemático de las isotermas de adsorción	27
CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		28
4.1	Conclusiones.....	28
	Recomendaciones	28
BIBLIOGRAFÍA		30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recursos materiales para la realización del proyecto.	9
Tabla 2. Modelos de la cinética de secado.	11
Tabla 3. Sales higroscópicas y sus actividades de agua a diferentes temperaturas.	12
Tabla 4. Parámetros estadísticos para el análisis de los modelos.	13
Tabla 5. Humedad y actividad de agua de las muestras post tratamiento y secas	15
Tabla 6. Tasas de pérdida de humedad y tiempo de secado óptimo	17
Tabla 7. Humedad crítica y de equilibrio, pérdida de humedad, velocidad de secado y tiempo de cada etapa.....	21
Tabla 8. Coeficientes de difusividad efectiva del agua de los cuatro tratamientos.	22
Tabla 9. Parámetros obtenidos en el modelado de la cinética de secado de las láminas de col	23
Tabla 10. Parámetros obtenidos mediante el modelado de las isothermas de adsorción de harinas de col.	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de la col	2
Figura 2. Repollo para comercialización.....	3
Figura 3. Tipos de isothermas.	6
Figura 4. Principios de una isoterma de adsorción.	7
Figura 5. Curvas de secado de las calabazas.	15
Figura 6. Curvas experimentales de las calabazas sometidas a diferentes pretratamientos.	16
Figura 7. Láminas de residuos de col sometidos a los diferentes pretratamientos.....	18
Figura 8. Curvas de velocidad de secado de las láminas de residuos de col sometidas a diferentes pretratamientos	19
Figura 9. Isothermas de adsorción de muestras de harinas de residuos de col sometidas a diferentes pretratamientos..	25
Figura 10. Curvas experimentales de las isothermas de adsorción de las harinas de col.....	26

RESUMEN EJECUTIVO

La col también conocida como *Brassica oleracea* var. *Capitata* L. es una de las hortalizas más consumidas en años recientes, debido a la cantidad de vitaminas y minerales que posee, no obstante, su consumo se limita al producto fresco. El presente proyecto evaluó la cinética de secado de residuos de col sometidos a pretratamientos (agua hirviendo, vapor y microondas) y, adicionalmente, se analizó el comportamiento de las isothermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas. Los resultados mostraron una reducción de la humedad superior al 80 por ciento mediante un secado convectivo de 8 horas a 65 grados centígrados, lo que llegó a una humedad crítica cercana a 2,68 kilogramos de agua por kg de sólidos secos y a una humedad de equilibrio de 0,04 kilogramos de vapor de agua por kg de sólidos secos. La pérdida de agua se ajustó mejor al modelo de Page modificado, y el coeficiente de difusividad indicó que los pretratamientos redujeron la energía de activación, favoreciendo el proceso de secado. La estabilidad de la harina se evaluó mediante la generación de isothermas de sorción, lo que dio lugar a curvas significativas tipo II, debido a la naturaleza y la estructura macroscópica del material. En la comparación de los modelos BET y GAB, se verificó que la fijación de agua es más intensa en la monocapa, y debido a ello el modelo BET presentó una correlación más alta, lo que lo consolida como la mejor opción para la comparación de adsorción.

Palabras clave: Secado de alimentos, isothermas de adsorción, col, modelos matemáticos, vida útil de alimentos.

ABSTRACT

Cabbage, also known as *Brassica oleracea* var. *Capitata* L., is one of the most consumed vegetables in recent years due to its high vitamin and mineral content; however, its consumption is largely limited to the fresh product. This project evaluated the drying kinetics of cabbage waste subjected to pretreatments (boiling water, steam, and microwave) and, additionally, analyzed the water adsorption isotherms of the resulting flours. The results showed a moisture reduction of over 80 percent through 8 hours of convective drying at 65 degrees Celsius, reaching a critical moisture content of approximately 2.68 kilograms of water per kilogram of dry solids and an equilibrium moisture content of 0.04 kilograms of water vapor per kilogram of dry solids. The water loss best fit the modified Page model, and the diffusivity coefficient indicated that the pretreatments reduced the activation energy, thus promoting the drying process. The stability of the flour was evaluated by generating sorption isotherms, which resulted in significant type II curves due to the nature and macroscopic structure of the material. Comparing the BET and GAB models, it was verified that water binding is more intense in the monolayer, and therefore the BET model showed a higher correlation, making it the best option for comparing adsorption.

Keywords: Food drying, adsorption isotherms, cabbage, mathematical models, food shelf life.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Justificación

En recientes el consumo por alimentos benéficos para la salud ha presentado un aumento significativo, dicho consumo busca satisfacer a una tendencia del mercado actual, no obstante, implica el compromiso con la estructura y composición química junto procesamiento conocido también como “*funcionales*”, esto debido a su contenido nutricional. Organizaciones como EFSA, FDA y la OMS han estado en la generación de nuevos alimentos funciones que benefician al organismo promoviendo la producción y consumo de esta clase de alimentos, esto se debe al aporte con vitaminas, probióticos, minerales, fibra y antioxidantes reduciendo posibles enfermedades crónicas (Zannini et al., 2022).

Es debido a ello que el emplear los residuos de la col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) en especial sus hojas son una buena fuente de fibra, compuestos fenólicos y pigmentos, que es posible recuperarlos mediante tratamientos físico-mecánicos para generar una harina que pueda ser funcional, reduciendo con ello la carga orgánica de desechos, generando un valor alternativo para el consumo (Mabry et al., 2021).

Por tal motivo, busca generar una estrategia clave dentro de los procesos de secados y almacenamiento, junto con un diseño optimo mantiene que los procesos puedan minimizar el tiempo junto al consumo energético sin que lleve a comprometer la calidad físico-químico. Uno de los retos de la actualidad consiste en cómo lograr llegar a alcanzar una seguridad y soberanía alimentaria, dicho eso, lo que busca es como obtener una técnica sostenible para generar una caracterización sostenible, implementando con ello el uso de técnicas de alto rendimiento para otorgar una mayor calidad del alimento.

Pese a ello es un producto que se caracteriza por presentar un 90% de humedad del total de su humedad correspondiente, debido a ello la *Brassica oleracea* var. *Capitata* L. es una hortaliza que tiene su origen en la región de Europa oriental, al poseer una alta adaptabilidad puede ser altamente cultivada y consumida en múltiples países, dentro del mercado de consumo los residuos son pocamente tratados para su consumo (Liu et al., 2024). No obstante, diversos estudios desarrollados en los últimos años revelaron que los residuos pueden ser procesados de forma que se pueda desarrollar un alimento funcional y óptimo para el consumo como lo es el desarrollo de harinas, fibras, o extractos, que son ricos en compuestos bioactivos que son altamente aprovechada en países europeos dentro de la industria alimentaria y farmacéutica. Con el objetivo de usar la recuperación de residuos de col, la presente investigación tiene como objetivo el desarrollo de una harina a partir de los residuos de col, con el propósito de generar un valor agregado y prolongar la vida útil sin que pueda presentar modificaciones en sus características nutricionales y funcionales (John et al., 2023).

La col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) es una hortaliza rica en vitaminas C, K junto con compuestos bioactivos, por tal motivo permite generar variaciones en las propiedades funcionales en su comportamiento frente al agua, alterando la estructura celular, alterando la capacidad de hinchamiento, retención de aceite e higroscopicidad del producto final, en conjunto con la generación de las isothermas de adsorción de agua junto a su cinética de secado definen en condiciones para la estabilización, aquí es posible controlar variables como la temperatura, fijo del aire, tamaño de partícula, siendo el resultado de la estabilidad, permitiendo el desarrollo de los ingredientes funcionales de alto valor añadid, otorgando con ello buenas características al producto (Vázquez et al., 2024).

1.1.2 Fundamentación teórica

1.1.2.1 Col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.)

1.1.2.1.1 Origen

La Col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) tiene un origen proviene de Europa, con la característica de pertenecer al mediterráneo y Atlántico del norte, esto debido a que se desarrolla en suelos húmedos y calcáreos. Con el transcurrir del tiempo, grupos de comunidades fueron y tomaron la especie para someterla a procesos de domesticación artificial, por tal motivo presentaron diferencias morfológicas, siendo la “var. capitata” una de las más relevantes dada la formación de una cabeza compacta de las hojas superpuestas. Este tipo de técnica se desarrollar por el siglo V y VI, extendiéndose por territorios de América y Asia, tendiendo una gran adaptación a terrenos o zonas con bajas temperaturas, con ello facilitando una adaptación en todo el mundo debido a esta característica, lo que condiciona en todo el mundo que el cultivo sea fresco (Mabry et al., 2021).

1.1.2.1.2 Descripción

La col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) conocida también como repollo, col arrepollada o cerrada, es un tipo de hortaliza bienal que es cultivada anual, pertenece a la familia de las *Brassicáceas*, su principal diferencia radica debido a la estructura que posee, presentando hojas grandes, carnosas (acumulación de agua) y galucas, se desarrollan sobre un tallo central corto, gormando el típico collogo compacto o cabeza, en donde deriva su epíteto varietal Capitata (Figura 1).



Figura 1. Planta de la col

Su tiempo de cosecha se realiza y suele durar entre el 70 y 130 días, su manejo se enfoca en maximizar el rendimiento junto a la calidad del collogo, presentando unas hojas firmes y principalmente el peso que adquiere al final para comercialización del producto (Fig 2); dado que busca que la cabeza este completamente formada, pero que no sea rígida, lo que puede generar problemas en la biomasa y la integridad estructural (Statilko et al., 2024).



Figura 2. Repollo para comercialización

1.1.2.1.3 Composición nutricional de la col

Estudios recientes han determinado que los residuos de col son una excelente fuente de bioactivos y nutrientes, dado que contienen glucosinolatos, compuestos fenólicos y flavonoides, por el cual provee antioxidante, antiinflamatorias que son útiles para la salud humano, provee enfermedades crónicas dado que ayuda a modular rutas metabólicas. Esto se debe en gran medida a la cantidad de minerales que posee dado que a que dicho producto contiene vitaminas como C, K, y A, siendo parte fundamental para el desarrollo de suplementos nutricionales, manteniendo la salud, in mundológica (Song et al., 2023; Yue et al., 2024).

1.1.2.2 Secado

El secado es una de técnicas más usadas a lo largo de la historia de la humana, tiene como principal objetivo generar una conservación de alimento por largos periodos de tiempo, debido a ello elimina gran cantidad de contenido acuoso del alimento, hasta generar un equilibrio con el ambiente que lo rodea, con ello se reduce el valor comercial de dicho producto o alimento (Mojica et al., 2020). Este proceso tiene la particularidad de poder ser realizado mediante 2 métodos, el primero es mediante el secado al sol, aprovechando el calor que genera, un proceso natural y un amplio espacio y tiempo; luego mediante un deshidratador o con mecanismo de degradación mediante aire caliente a un horno, microondas (Zagaceta et al., 2020).

Sin embargo, esta clase de procedimiento tiende a generar efectos secundarios durante el secado de la materia prima, en el caso de los residuos de la col, tienden a una pérdida de compuestos bioactivos y antioxidantes, pérdida de cambios estructurales generando un endurecimiento en las paredes celulares, pérdida del color característico, una generación de aroma debido al pardeamiento por la deshidratación (Andersa et al., 2025; Mahfoud et al., 2025; Zagaceta et al., 2020).

1.1.2.2.1 Condiciones de secado

En el desarrollo de esta investigación es de vital importancia, esto debido a que se planea la transformación de los residuos de la col para el desarrollo de una harina; de manera que, es ideal conocer los análisis como el contenido de humedad, la temperatura con la que se trabaja, las láminas de transferencia de calor junto las características de la materia prima (Alzate et al., 2003):

- **Humedad promedio:** describe el contenido de agua durante un intervalo de secado.
- **Humedad de equilibrio (x_e):** hace referencia al contenido de humedad donde no existe intercambio con el ambiente, la materia alcanza estabilidad, luego de colocar a un ambiente donde controla humedad, temperatura y vapor.
- **Humedad crítica (x_c):** es el límite entre velocidad constante y decreciente con el secado, conocido por ser el punto de inflexión con respecto a la velocidad de secado.

1.1.2.3 Tratamientos previos al secado

Para que un producto pueda pasar por un proceso agresivo de secado y, con ello, conservar gran parte de las propiedades de la materia prima, es indispensable someterlo a varios pretratamientos. Los más comunes para las especies de *Brassica oleracea* var son las siguientes, pre-secado, el escaldado, recubrimiento y el remojo en soluciones acuosa, el principal motivo por el cual se lo realiza se debe a evitar la generación de olores indeseables para el consumidor, evitar la oxidación, elimina las ceras protectoras, la inactivación de enzimas y junto a ello que tenga la posibilidad de tener una mejor digestibilidad (Vega-Galvez et al., 2023).

Por respuesta, al momento de realizar la selección de la materia prima será indispensable para la calidad de la propia harina que se va desarrollar. Según lo mencionado por Ozcelik et al.(2023) y Uuh-Narvaez & Segura-Campos (2021), al someter la materia prima en varios pretratamientos presenta una tendencia para romper su estructura celular, estos pretratamientos pueden ser radiación de microondas, vapor, cocción, generando por consiguiente así junto con las propiedades fisicoquímicas.

1.1.2.3.1 Láminas de col precocido en agua

El tratamiento con agua hirviendo tiende a romper la estructura original, lo que se desea es una textura más delgada a la original. Para un procesamiento adecuado es recomendable un tiempo entre los 5 a 10 min, dado que, si se supera el tiempo mínimo, la estructura tiende a romper su estructura celular debido a la desnaturalización de proteínas y solubilización parcial de la hemicelulosa junto a la pectina, sin contar el cambio físico en cuando la estructura y la coloración (H. Wang et al., 2025). Es la razón por la cual se debe establecer las condiciones de tiempo y temperatura antes del proceso de deshidratación y convertidos en harina.

1.1.2.3.2 Láminas de col precocido a vapor

El proceso de cocción a vapor es un proceso que implica el uso de vapor para cocinar alimentos, se caracteriza por la conservación de propiedades nutricionales como las vitaminas hidrosolubles, minerales y ciertos antioxidantes, esto debido a que se encuentra a una temperatura de 100°C o más, lo que facilita el transporte de calor por la lámina de col (**Razzak et al., 2023**). Dentro de este ámbito, el estudio realizado por **Haw et al. (2020)**, se revela que al ser sometido hojas mediante al vapor durante 10 min, para posteriormente ser secado a 120 °C por 10 horas, demostró una presencia baja de antioxidantes con compuestos fenólicos, junto a proteína, grasa y fibra.

1.1.2.3.3 Láminas de col Precocido en Microondas

Se trata de un procedimiento que utiliza ondas electromagnéticas de alta frecuencia para que un sistema cerrado alcance temperaturas elevadas, por medio de la vibración y fricción entre los iones y moléculas de agua de los alimentos. En este caso, las variables a considerar son el tiempo y la potencia de tratamiento. Estudios demuestran que tratar alimentos con 210-315 W por 3 minutos, aumenta la cantidad de saponinas, terpenoides, carotenoides, contenido fenólico total, e inactiva el polifenol oxidasa y peroxidasa (**Mejías et al., 2024; Ștefan & Ona, 2020**).

1.1.2.4 Cinética de Secado

Es la velocidad que presenta al remover la humedad de una materia prima durante un tiempo establecido, esto es posible debido a las condiciones controladas, todo esto se logra mediante el control de la temperatura, velocidad y humedad del aire secado, es una de las formas más efectivas para el estudio de transferencia de calor mediante establecer curvas de secado, en ella es posible visualizar la razón de humedad con respecto a la velocidad de secado con referente al tiempo, las cuales son más distinguible mediante periodos de velocidad decreciente (**Khater et al., 2025; Tiliwa et al., 2023**).

1.1.2.4.1 Coeficiente de difusión efectivo del agua

Dentro del proceso de deshidratación, el coeficiente de difusión permite modelar y diseñar los datos cinéticos relacionados con los procesos de secado, sorción y generación; por ello, refleja la transmisión entre la masa interna de la materia prima. Evalúa el equilibrio mediante la ecuación de transferencia de masa presentando una ecuación analítica. Es por ello por lo que su importancia se da para precisar la velocidad de fenómeno que se está desarrollando (**Zhao et al., 2023**).

1.1.2.4.2 Modelos matemáticos

Con lo establecido por **Vega-Galvez et al., (2024)**, para desarrollar el proceso de secado, estudio las relaciones que presenta la temperatura con el secado convectivo sobre el comportamiento de la isoterma

de absorción, con la cinética de secado, consumo de energía, empleando en medio de ello un modelado matemático tanto teórico como empírico, mediante el cual es posible determinar las condiciones de tiempo y temperatura. Los modelos aplicados permiten observar una relación de humedad en función del tiempo, además de obtener datos experimentales, sin necesidad de ser sometidas a cada experiencia. En la actualidad, incluso mediante softwares especializados es fácil desarrollar una predicción para el análisis, diseño y optimización de secado.

1.1.2.5 Isotermas de adsorción

La generación de isoterma se encarga de representar la actividad de agua de la materia prima junto con su contenido, mediante las variables predeterminadas (temperatura y humedad relativa). Con respecto a la clasificación IUPAC, existen 6 tipos, como se muestra en la Figura 3. El primero describe materiales que presenta microporosidades, los tipos II y III respectivamente a la adsorción de adsorbentes macroscópicas no porosos, mientras que los tipos IV y V refleja la cantidad de adsorción en monocapa y multicapa histéresis de superficies mesoporosas y el tipo VI son para las superficies no porosas (Donohue & Aranovich, 1998).

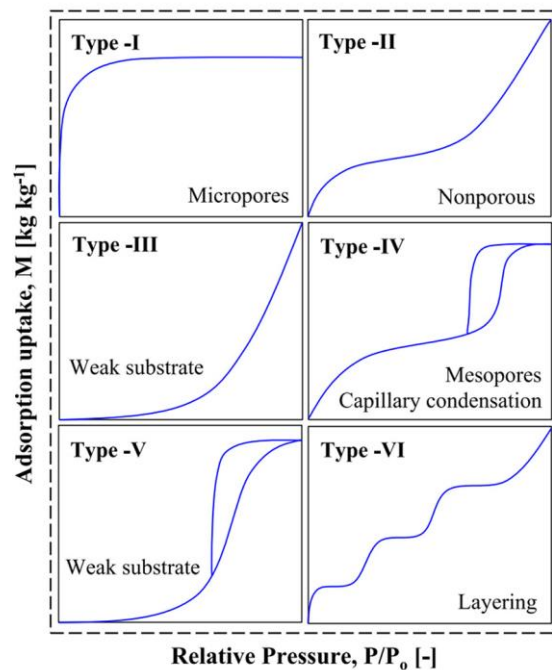


Figura 3. Tipos de isotermas.

Nota. Fuente: Riaz et al. (2022).

En el caso de los alimentos, las isotermas de adsorción de agua para los tipos II y III se caracterizan por presentar curvar sigmoideas, estas principalmente describen el contenido de humedad de la materia prima con respecto a la actividad de agua con una temperatura constante. Obtenido por la variación del peso de las muestras a condiciones de humedad relativa para alcázar el equilibrio del producto (Figura

4.), la zona A de la curva es la capa molecular, su contenido de agua es bajo y esta unidos a sitios polares, mientras la zona B es la capa multimolecular, donde el agua está ligada a moléculas absorbidas en la capa A; mientras la región C, representa el agua libre que se asocia a componentes sólidos y puede evaporarse (Paul Singh & Heldman, 2008; Riaz et al., 2022).

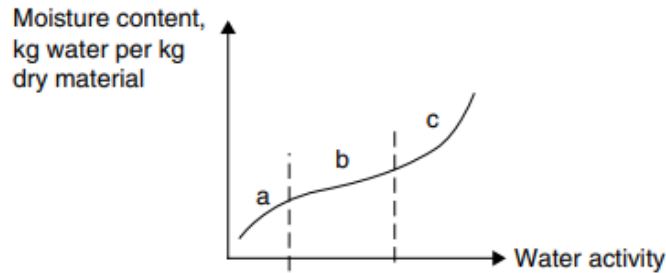


Figura 4. Principios de una isoterma de adsorción.

Nota: Fuente: Paul Singh & Heldman, (2008)

1.1.2.5.1 Modelo matemático BET

El modelo Brunauer–Emmett–Teller (BET) es una de las formas de interpretación de las isotermas de adsorción de materiales porosos, como puede ser el agua en matrices alimentarias, polímeros y sólidos (Ec.1), y amplía los postulados de la teoría de Langmuir. El fundamento teórico del modelo BET se basa en una serie de supuestos simplificadores: se considera que el sólido posee una superficie homogénea, que las interacciones moleculares entre las capas adsorbidas son limitadas y que existe un equilibrio dinámico local entre las moléculas adsorbidas y las que permanecen en fase de vapor; se ha consolidado como una herramienta fundamental para estimar la cantidad de agua adsorbida en la capa monomolecular, la cual se considera un indicador clave de la estabilidad higroscópica y la conservación de los alimentos. De acuerdo con las recomendaciones metodológicas, la ecuación presenta su mayor grado de ajuste para valores de actividad de agua comprendidos entre 0,05 y 0,35, rango en el cual se mantiene la validez de los supuestos del modelo (Mohamadou et al., 2020; Nguyen & Ramanathan, 2020).

$$x_e = \frac{x_m \times C_{BET} \times a_w}{(1 - a_w) [1 + (C_{BET} - 1) a_w]} \quad [\text{Ec.1}]$$

Donde:

x_e : humedad de equilibrio $\left[\frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{sólidos secos}}} \right]$

x_m : humedad en la monocapa $\left[\frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{sólidos secos}}} \right]$

C_{BET} : constante relacionada con el calor de sorción

1.1.2.5.2 Modelado matemático GAB

Con respecto al modelado fue desarrollado por Guggenheim-Anderson-DeBoer (Ecuación 2), en conjunto con el modelado BET, es empleado en el ajuste del contenido de agua y las isothermas de sorción de alimentos, llegando a un ajuste similar a 0.9 en varias materias primas como los cárnicos, frutas, hortalizas (Ihuaraqui & Bardales, 2023; Paul Singh & Heldman, 2008).

$$x_e = \frac{x_m \times C_{GAB} \times K_{GAB} \times a_w}{[1 - (K_{GAB} \times a_w)] [1 - (1 - C_{GAB})(K_{GAB} \times a_w)]} \quad [\text{Ec.2}]$$

Donde:

x_e : humedad de equilibrio $\left[\frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{sólidos secos}}} \right]$

x_m : humedad de la monocapa $\left[\frac{g_{\text{agua}}}{g_{\text{sólidos secos}}} \right]$

C_{GAB} : constante de Guggenheim (característica del producto y relacionada con el calor de sorción de la monocapa).

K_{GAB} : factor de corrección relacionado con el calor de sorción.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Modelar la cinética de secado de residuos de col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) sometidos a diferentes pretratamientos y las isothermas de adsorción de agua de la harina obtenida.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Construir la curva de cinética de secado de los residuos de col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) sometidos a diferentes pretratamientos y las isothermas de adsorción de agua de la harina obtenida.
- Correlacionar los datos de la curva de cinética de secado y las isothermas de adsorción de agua de la harina obtenida, con modelos matemáticos referenciales.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la harina obtenida a partir de los residuos de col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.).

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1 Materiales

En el trabajo de investigación desarrollado, fue necesario utilizar los recursos disponibles en la Unidad Operativa de Investigación y Desarrollo (UODIDE) de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, descritos en la Tabla 1.

Tabla 1.

Recursos materiales para la realización del proyecto.

Reactivos	Cantidad
Agua destilada	1000 mL
Alcohol al 70%	1000 mL
Cloruro de litio	50 g
Acetato de potasio	50 g
Cloruro de magnesio 50 g	50 g
Bromuro de sodio	50 g
Sulfato de amonio	50 g
Equipos	Tiempo [h]
Cámara de secado	32
Cocina industrial	1
Microondas	1
Balanza analítica	32
Material de Laboratorio	Unidades
Frascos herméticos	10
Vasos de precipitación	4
Bandejas	4
Espátula	1
Mortero	1
Varilla de agitación	1
Matraz	4
Cuchillo	1
Papel absorbente	1

2.2 Métodos

2.2.1 Construir la curva de cinética de secado de las láminas del residuo de la col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) sometida a diferentes pretratamientos

2.2.1.1 Materia prima

Se seleccionaron láminas de col en estado íntegro y se limpiaron y desinfectaron para que posteriormente fueran tratadas según cada uno de los pretratamientos escogidos.

2.2.1.2 Pretratamientos

Los residuos de col fueron cortados en láminas de 2 cm de ancho y 8 cm de largo, para facilitar el proceso de los pretratamientos. Los pretratamientos se seleccionaron de acuerdo con lo establecido por **Srimagal, (2016)**. Posteriormente se procedió con los pretratamientos descritos a continuación.

2.1.1.1.1 Láminas de col crudo (control)

En este caso, se colocaron 800 g de láminas de col. Esta fue sometida directamente al secado con el propósito de utilizarla como muestra de control.

2.1.1.1.2 Láminas de col en agua hirviendo

Los 800 g de las láminas en este caso fueron tratados en agua hirviendo durante 5 minutos, a continuación, se enfrió con agua corriente y se eliminó el exceso de humedad mediante papel absorbente.

2.1.1.1.3 Láminas de col precocido a vapor

Se usaron 800 g de muestra que fueron sometidos a un blanqueamiento durante 5 min; posteriormente, se enfriaron y se retiró el exceso de humedad mediante papel absorbente.

2.1.1.1.4 Láminas de col precocido en microondas

El último pretratamiento fue el más agresivo. En este caso las láminas fueron tratadas a 600 W por un periodo de tiempo de 30 segundos y posteriormente se enfriaron con agua corriente y se eliminó el exceso de agua mediante papel absorbente.

2.2.1.3 Secado y elaboración de harina

Cada muestra fue llevada a una cámara de secado convectivo (Grander MTN, modelo CD 160, Saint Paul, MN, USA), que operó a 65 °C durante 8 horas, con una velocidad del aire de 2 m/s. Las muestras se colocaron en mallas metálicas de 450×450 mm. Las láminas se pesaron cada 10 minutos durante las 2 primeras horas y cada 30 minutos hasta completar las 8 horas del secado. Finalizado dicho proceso, las láminas se pulverizaron usando un molino eléctrico (Hamilton Beach, modelo: 80,393, Picton, Canadá), en tres intervalos de 10 s, tal y como se describe en la metodología propuesta por **(Acurio et al., 2024)**.

2.2.1.4 Determinación de la humedad

Se optó por el método gravimétrico 925.10, establecido por **Horwitz & Latimer, (2006)**. Se empleó una estufa de aire forzado a 105°C hasta conseguir peso constante (Ecuación 3).

$$\%H = \frac{P_i - P_f}{P_m} \times 100 \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

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 cinética de secado con modelos matemáticos referenciales

2.2.2.1 Determinación del coeficiente de difusión efectivo del agua

Según **O'Callaghan et al. (1971)**, la velocidad para que un alimento pierda agua depende del factor de difusión, determinado por la Ecuación 4, obtenido mediante la ley de Fick para láminas finas.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left(-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 \times L^2} \times t \right) \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

D_{eff} : coeficiente de difusión efectivo del agua $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

L : mitad del espesor [m]

t : tiempo de secado [s]

2.2.2.2 Modelado matemático de la cinética de secado

Con el propósito de establecer la tasa de pérdida de agua de las muestras (cruda, agua hirviendo, vapor y microondas), los valores experimentales fueron ajustados a los modelos reportados en la Tabla 2.

Tabla 2.

Modelos de la cinética de secado.

Modelo	Ecuación	Nº	Referencia
Newton	$MR = e^{-kt}$	[Ec. 5]	O'Callaghan et al. (1971)
Page	$MR = e^{-kt^n}$	[Ec. 6]	Page (1949)
Page modificado	$MR = e^{(-kt)^n}$	[Ec. 7]	Overhults et al. (1973)
Henderson y Pabis	$MR = ae^{-kt}$	[Ec. 8]	Henderson & Pabis (1961)
Logarítmico	$MR = ae^{-kt} + c$	[Ec. 9]	Yagcioglu et al. (1999)
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	[Ec. 10]	Singh & Wang (1978)

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

En estos modelos la relación de humedad o ratio MR, se calculó mediante la Ecuación 11.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad [\text{Ec. 11}]$$

Donde:

MR: ratio de humedad

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

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

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

2.2.3 Correlacionar los datos de las isotermas de adsorción de agua de la harina de las láminas de residuos de col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) con modelos matemáticos referenciales

2.1.1.1 Isotermas de adsorción de agua

Para evaluar la capacidad de adsorción de agua, es necesario el uso del método estandarizado de Spines y Wolf propuesto en 1985, propuesto y citado por Vega et al. (2006). Este procedimiento consiste en pesar una cantidad determinada de muestra y colocarla dentro de un recipiente herméticamente cerrado, junto con disoluciones saturadas de sales higroscópicas (Tabla 3), cuyas actividades de agua son conocidas. Dichas soluciones regulan la humedad relativa interna del sistema, permitiendo que la muestra adsorba o libere vapor de agua hasta alcanzar el equilibrio higroscópico.

Tabla 3.

Sales higroscópicas y sus actividades de agua a diferentes temperaturas.

Nombre	Nomenclatura	Actividad de agua (a_w)
Cloruro de litio	LiCl	0,1178
Acetato de potasio	CH ₃ CO ₂ K	0,2982
Cloruro de magnesio	MgCl ₂	0,3425
Bromuro de sodio	NaBr	0,5732
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,8012

Fuente: Acurio et al. (2023).

2.1.1.2 Cálculo de la humedad de equilibrio

El contenido de humedad de las harinas de col, expuestas a las condiciones específicas de temperatura y humedad relativa, que se estableció con la Ecuación 12.

$$x_{e(b.s)} = \frac{P_0 x_o + \Delta P}{P_0 (1 - x_o)} \quad [\text{Ec. 12}]$$

Donde:

$x_{e(b,s)}$: humedad en equilibrio $\left[\frac{g_{agua}}{g_{sólidos secos}} \right]$

P_0 : peso inicial de la muestra $[g]$

x_o : humedad inicial de la muestra $\left[\frac{g_{agua}}{g_{sólidos secos}} \right]$

ΔP : variación de peso (equilibrio – inicial) $[g]$

2.1.1.3 Modelado de las isotermas de adsorción

Se utilizaron los modelos BET (Ecuación 1) y GAB (Ecuación 2) para facilitar el análisis del comportamiento de las harinas de col en cuanto a la adsorción de agua.

2.1.1.4 Análisis estadístico

Para el análisis de los modelos matemáticos, de la cinética de secado (Tabla 2) como las isotermas de adsorción, se determinaron el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE) (Inyang et al., 2018) (Tabla 4).

Tabla 4.

Parámetros estadísticos para el análisis de los modelos.

Parámetro		Ecuación	Nº
Coeficiente de determinación		$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,ii} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}$	[Ec.13]
Error cuadrático medio		$RMSE = \left[\sum_{i=0}^N \frac{1}{N} (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$	[Ec.14]
Error absoluto medio		$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{ MR_{exp,i} - MR_{pre,i} }{N}$	[Ec.15]

Nota: Donde $N = n$: número de observaciones, $MR_{exp,i}$: valor experimental de la relación de humedad, $MR_{pre,i}$: valor medio previsto de ratio de humedad.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

3.1.1 Humedad y actividad de agua de las láminas de col sometidas a diferentes pretratamientos

La Tabla 5 evidencia el efecto del proceso de secado convectivo en las láminas de col, lo que provoca una reducción de hasta el 80% de la humedad. Este resultado coincide con lo mencionado por **Vega-Galvez et al. (2024)**, quienes reportaron que la deshidratación de *Brassica oleracea* var. *Capitata rubra* tiende a provocar una pérdida de humedad superior al 70%. Además, se reporta que la deshidratación a 65 °C influye en una correcta deshidratación de la col, sin causar mayores cambios en sus propiedades físicas (**Bas-Bellver et al., 2022; Luka et al., 2024**).

Adicionalmente se puede observar que las láminas de col frescas aumentan su humedad después de ser sometidas a los diferentes pretratamientos, a excepción de las muestras tratadas con microondas, y esto puede deberse a la ruptura de las paredes celulares y por consecuencia a la hidratación de los tejidos durante los pretratamientos (**Vega-Galvez et al., 2024**).

La mayoría de las muestras deshidratadas registraron contenidos de humedad inferiores a lo establecido por **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & World Health Organization (WHO) (1985)** y la norma **INEN 616 (2015)**, que sugieren que los alimentos de este tipo presenten valores de humedad iguales o inferiores a 15,5% y 14,5%, respectivamente. Solo la muestra pretratada con vapor presenta un valor de $14,94 \pm 0,45$ %, ligeramente por encima del valor sugerido por la normativa local.

En cuanto a la actividad de agua, las muestras previas al secado presentan valores entre 0,967 y 0,994. Mientras que las muestras secas presentan valores entre 0,29 y 0,49, todos por debajo del límite crítico de 0,85, lo que evidencia que serán alimentos menos susceptibles a la proliferación de agentes patógenos y hongos (**Maltini et al., 2003**). Con estos resultados se evidencia que los pretratamientos con agua hirviendo y microondas generan un mayor cambio en la estructura del alimento por lo que favorecen una mayor pérdida de agua durante el proceso de secado (**Ignaczak et al., 2023**).

La aplicación de los pretratamientos dentro de la elaboración de la harina ha generado cambios notorios dentro de la humedad y por consecuente en su respectiva actividad de agua, los valores dentro de la Tabla 5 para P-valor reflejan que los cambios fueron menores a 0.05 en todas las variables analizadas, permitiendo identificar grupos de homogéneos de medias dentro de la actividad de agua. Lo que consigue es rechazar la H_0 , dado que se comparó la viabilidad dentro de las muestras, motivo por el cual, son consecuentes con los tratamientos empleados dentro de la muestra alterando la estructura celular, extracelular y la disponibilidad de agua.

Tabla 5.

Humedad y actividad de agua de las muestras postratamiento y secas

Pretratamiento	Post tratamiento		Secas	
	Humedad [%]	Actividad de agua	Humedad [%]	Actividad de agua
Control	91,94 (0,64) ^c	0,967 (0,04) ^c	13,91 (0,80) ^a	0,49 (0,0004) ^a
Agua hirviendo	93,41 (0,76) ^a	0,994 (0,0004) ^a	6,34 (0,41) ^c	0,31 (0,012) ^c
Vapor	92,47 (0,06) ^b	0,992 (0,002) ^a	14,94 (0,45) ^a	0,45 (0,002) ^b
Microondas	91,03 (0,47) ^c	0,990 (0,001) ^b	7,91 (0,36) ^b	0,29 (0,027) ^d
P-valor	$4,033 \times 10^{-4}$	$8,85 \times 10^{-8}$	$2,148 \times 10^{-5}$	$3,75 \times 10^{-7}$

Nota. Los valores presentados corresponden al promedio de tres repeticiones, con su desviación estándar y el valor p.

3.1.2 Curvas de cinética de secado

La Figura 5 refleja la pérdida de humedad frente al tiempo, tendencia que se conoce como ‘*curva de secado*’ (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Se observa que la muestra sometida al agua hirviendo presenta un alto contenido de humedad inicial (13,66 kg agua/kg sólidos secos), seguido por la muestra control, con 13,48 kg agua/kg sólidos secos. Mientras que la muestra sometida a microondas presenta una diferencia significativa con 9,37 kg agua/kg sólidos secos. Según lo mencionado por Mejías et al. (2024), el pretratamiento con agua hirviendo genera un aumento de humedad, mientras que las microondas rompen la pared celular de los alimentos, siendo así un procedimiento más agresivo y generando una reducción del tiempo de secado (Gudiño et al., 2024; Nzimande et al., 2024).

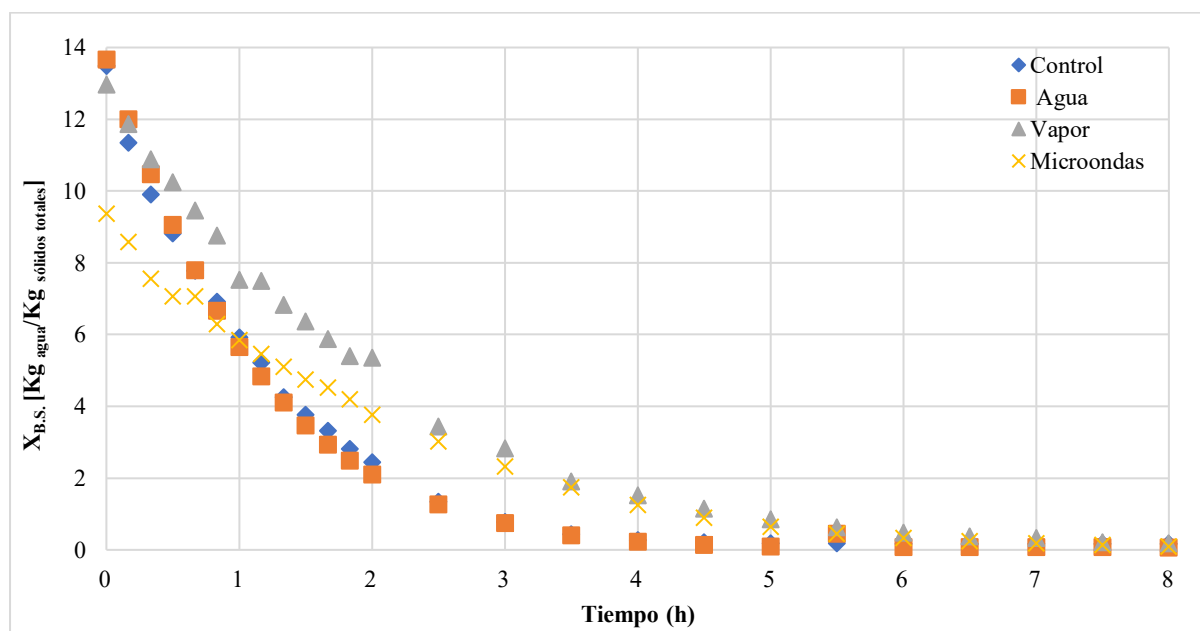


Figura 5. Curvas de secado de las láminas de residuos de col.

El comportamiento individual de todas las muestras se reportó en la Figura 6. Esto permite analizar la tendencia de pérdida de agua de forma individual y observar los valores de la desviación estándar en cada punto, lo que demuestra que el ensayo se desarrolló de forma minuciosa y por ende que los datos experimentales obtenidos son homogéneos (Ruiz Espejo, 2017).

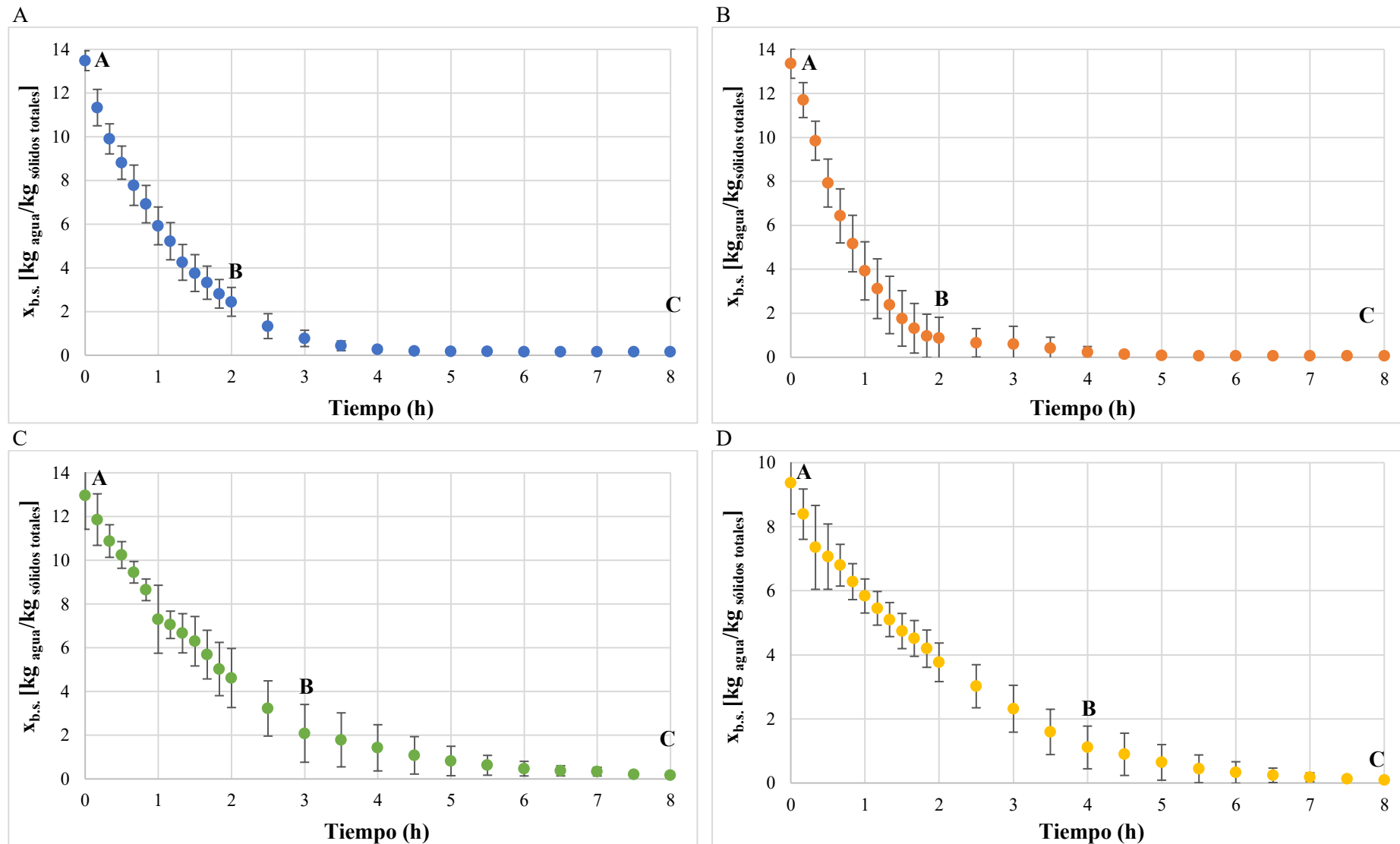


Figura 6. Curvas experimentales de las láminas de residuos de col sometidas a diferentes pretratamientos.

Nota. (A) Control, (B) Agua hirviendo, (C) Vapor y (D) Microondas.

Cada ilustración refleja las etapas de secado, se observa la línea de tendencia decreciente lineal (A-B) desde su punto inicial hasta el punto de inflexión B. Seguida de una segunda fase con una tendencia que se aproxima a la linealidad horizontal hasta el final del secado a las 8 horas (B-C) (Valentas et al., 1997).

En la Tabla 6 se reportan los valores de las tasas de pérdida de humedad en las dos etapas descritas previamente. Nótese que el pretratamiento con agua hirviendo acelera la pérdida de agua, alcanzando el punto B a las dos horas de procesamiento (Figura 6 B). Además, considerando que, por norma, la muestra debe tener una humedad inferior al 15 kg agua/kg totales (0,1765 kg agua/kg sólidos totales), se determinó el tiempo óptimo de secado para cada muestra, lo que permitió concluir que la aplicación de microondas podría reducir considerablemente el tiempo de tratamiento de esta fruta.

Tabla 6.

Tasas de pérdida de humedad y tiempo de secado óptimo

Muestra	Humedad en el punto B $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido\ seco}} \right]$	Tasa de pérdida de humedad (A-B) $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido\ seco} \times h} \right]$	Tasa de pérdida de humedad (B-C) $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido\ seco} \times h} \right]$	Tiempo de secado óptimo [h] al alcanzar $0,1765 \left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido\ seco}} \right]$
Control	2,50	1,83	0,25	5,50
Agua hirviendo	1,80	3,05	0,20	5,00
Vapor	2,08	2,24	0,18	5,61
Microondas	1,11	2,63	0,24	2,78

Sin embargo, este análisis de tiempo no debe ser el único a considerar al decidir el pretratamiento que mejor se adapta al secado de este alimento. Se deben además analizar otras propiedades como por ejemplo el color de las muestras, que es una de las características principales que juzgan los consumidores al adquirir productos deshidratados.

En la Figura 7 se observan los cambios que sufren las muestras de láminas de residuos de col tras cada uno de los pretratamientos aplicados. Nótese que la muestra tratada con agua hirviendo presenta un cambio de color evidente, debido al rompimiento de su estructura, discutido previamente (Figura 7A). Además, es importante destacar que a pesar de que la aplicación de microondas se suele considerar como un pretratamiento agresivo, las muestras en este caso no reflejaron cambios evidentes al ojo humano.

A



B



C



D



Figura 7. Láminas de residuos de col sometidos a los diferentes pretratamientos.

Nota. (A) Muestras control, (B) Precocción con agua, (C) Precocción con vapor y (D) Microondas

3.1.3 Curvas de velocidad de secado

Mediante los datos presentados en las curvas anteriores, se obtuvieron las gráficas de la Figura 8 donde se presenta la variación de la «tasa de secado» con respecto a la humedad en base seca. En todos los casos se distingue en secciones: A-B, indicando el inicio de secado con la etapa de adaptación, mientras el tramo de B-C representa la velocidad constante, en contraste el tramo de C-D representa la tasa de secado; debido a ello; la zona C indica el contenido de humedad crítico de las muestras, esto es posible porque en el punto D refleja la etapa de evaporación una vez que la muestra está seca e inicia la etapa de evaporación interna (D-E) donde existe una conservación de la razón de pérdida o esta puede reducir (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005; Paul Singh & Heldman, 2008).

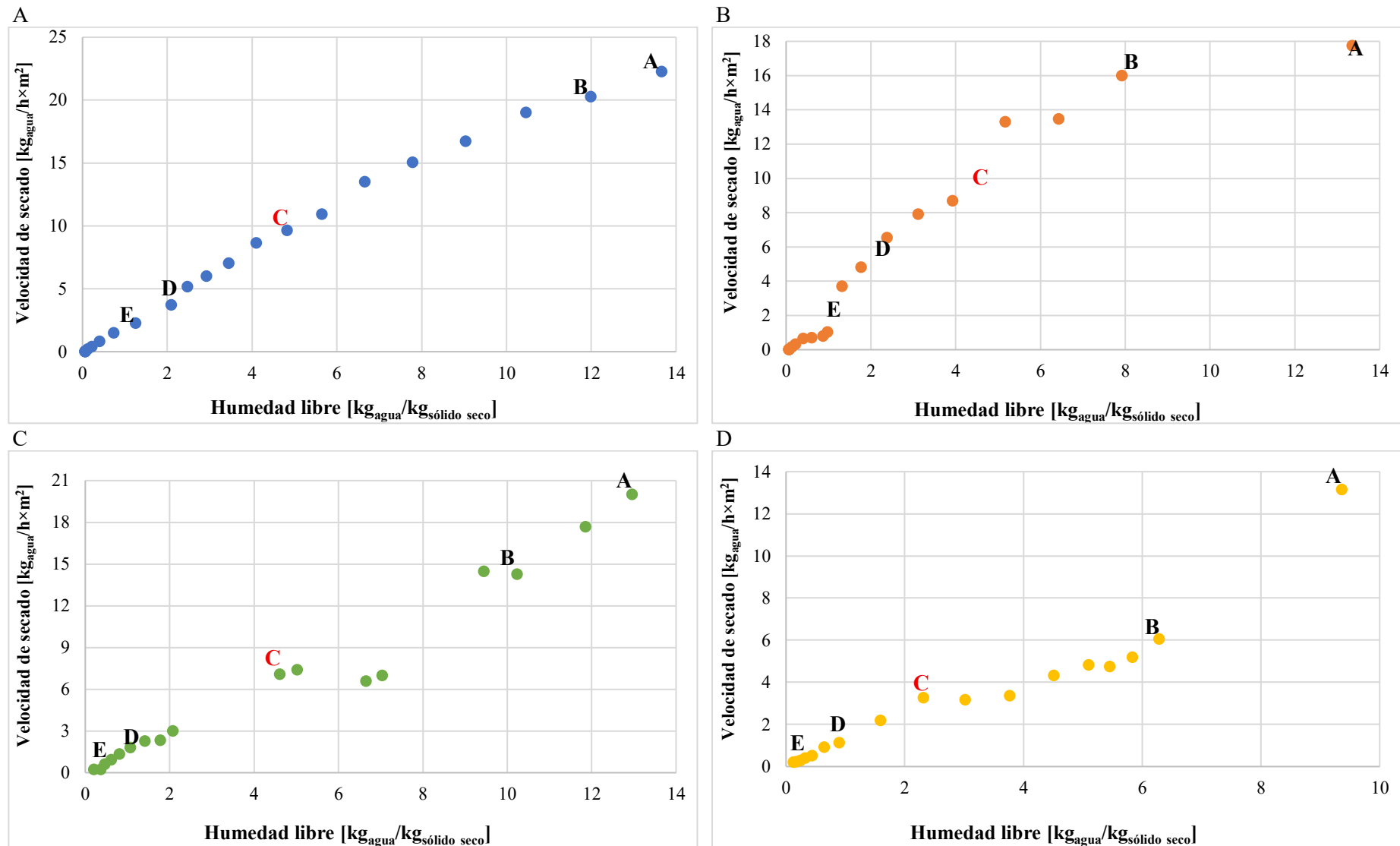


Figura 8. Curvas de velocidad de secado de las láminas de residuos de col sometidas a diferentes pretratamientos.

Nota. (A) Control, (B) Agua hirviendo, (C) Vapor y (D) Microondas

La Figura 8 presenta las siguientes fases de secado: la primera etapa de precalentamiento (A-B), la etapa de pérdida de agua constante (B-C), en la que se elimina la mayor cantidad de agua libre del alimento. En la tercera etapa se elimina principalmente el agua ligada presente en la superficie de la lámina de col (C-D), y finalmente en la cuarta etapa se da la pérdida de agua ligada en el interior (D-E) (**Casp Vanaclocha & Abril Requena, 2003**).

Mediante el análisis de estas etapas, se generó la Tabla 7, en esta se explica el efecto de los pretratamientos y el aire seco con el secado convectivo. Nótese que la pérdida de humedad es predominante en los tramos de B-C y C-D. Esto se debe a que los procesos de secado están dominados por la difusión entre la masa del agua interna hacia la superficie y la transferencia hacia el aire caliente (**Afolabi et al., 2014**).

Lo más destacable es una reducción de la velocidad a partir del punto D dentro de intervalo D-E. Este cambio refleja una caída de la tasa de secado, generando una formación de solutos dentro de la superficie de la muestra (**Casp Vanaclocha & Abril Requena, 2003; Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005**). Por tal motivo, el movimiento de las zonas A, B y C genera zonas en las que las partículas se mueven y obstruyen las áreas de transferencia de masa, lo que limita la pérdida de agua. En este tramo, la muestra control (Figura 8A) y la que fue sometida al pretratamiento con vapor (Figura 8B), presentan una pérdida de humedad de 1,3347 kg agua/kg sólidos secos y 1,7868 kg agua/kg sólidos secos, respectivamente. Según **Singh et al. (2024)**, esto se debe a que la pérdida de agua en estas etapas corresponde al agua ligada, que es difícil de eliminar y suele cesar cuando alcanza la humedad de equilibrio.

El análisis de los valores de humedad de equilibrio (x_e) evidenció que las muestras control y pretratadas con vapor presentaron un valor representativo más alto frente al resto de muestras (0,1616 kg agua/kg sólidos secos). De forma contraria, las muestras sometidas a agua hirviendo y con microondas presentan un valor menor (0,0767 kg agua/kg sólidos secos), esto es fundamental para lograr una estabilidad amplia durante la etapa de almacenamiento y generar el cálculo de tiempo de vida útil (**Saravacos & Maroulis, 2011**).

La muestra que presenta una humedad crítica (x_c) elevada pertenece a la muestra sometida al vapor con (6,2973 kg agua/kg sólidos secos), relacionado con su contenido de humedad de la harina resultante con 14,94% (Tabla 7). Según **Vega-Galvez et al. (2024)**, este es el punto exacto donde se marca el fin de la fase de secado superficial y el inicio del secado interno, un momento crucial para determinar la eficiencia del proceso y la calidad final del producto al afectar la transferencia de masa y energía.

La combinación de los pretratamientos junto con el tiempo y la temperatura fueron factores clave para el secado de láminas. Además, se evidenció que las muestras pretratadas con vapor y agua hirviendo al hidratarse durante el pretratamiento necesitan mayores tiempos de procesamiento para eliminar la cantidad de agua hasta valores más estables (**Srimagal, 2016**).

Tabla 7.

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

Muestra	$\frac{x_c}{\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido seco}}\right]}$	$\frac{x_e}{\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido seco}}\right]}$	Etapas	Pérdida de humedad $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido seco}}\right]$	Velocidad de secado $\left[\frac{kg_{agua}}{h \times m^2}\right]$	Tiempo [h]
Control	3,7632	0,1616	A-B	3,5786	1,8325	0,333
			B-C	6,1424	0,9696	1,166
			C-D	2,4284	0,4457	1,000
			D-E	0,6104	0,0654	5,500
Agua	1,7683	0,0677	A-B	6,2949	18,5287	0,666
			B-C	4,6611	10,9799	0,833
			C-D	1,1122	3,3731	1,000
			D-E	0,5391	0,2408	5,500
Vapor	6,2973	0,1756	A-B	2,0905	18,7045	0,333
			B-C	4,5816	12,4418	1,1667
			C-D	4,5106	7,6389	2,000
			D-E	1,6111	1,1391	4,500
Microondas	4,7444	0,0858	A-B	2,5542	7,8287	1,000
			B-C	1,0936	5,1953	0,500
			C-D	1,7236	4,2676	1,000
			D-E	3,0172	1,3785	5,500

3.1.4 Modelados matemáticos de la cinética de secado

Se utilizaron diferentes ecuaciones matemáticas (Ec. 4-10), para explicar el comportamiento de las muestras en el proceso de secado, donde la razón de pérdida de humedad (MR) se relaciona con la variable independiente tiempo [h]. Entre ellas se tiene una de tipo teórico (Ec.4), que se deriva de la Segunda Ley de Difusión de Fick.

En la Tabla 8 se reportan los valores del coeficiente de difusividad efectiva del agua (D_{eff}), que evidencia la cantidad de moléculas que se mueven por la lámina de col con una combinación entre la difusión superficial junto a la molecular, flujo capilar, Knudsen e hidrodinámico (Erbay & Icier, 2010).

Los valores están en el rango de 10^{-9} (m²/s) y según lo mencionado por Madamba et al. (1996), en alimentos el coeficiente de difusividad efectiva del agua ronda entre $1,0723 \times 10^{-9}$ a $2,0222 \times 10^{-9}$ m²/s. Según Oliveira et al. (2016), este coeficiente se ve influenciado por las condiciones de secado, los pretratamientos y la composición de los alimentos.

Es importante señalar que el D_{eff} influye en la energía de activación, con ello, cuando el coeficiente es ‘alto’ es necesario una energía térmica para mover y transformar la humedad, lo que indica que los pretratamientos de las muestras como el agua caliente favorecen la transferencia de agua durante el secado (Sarkar et al., 2021).

Tabla 8.

Coeficientes de difusividad efectiva del agua de los cuatro tratamientos.

Muestra	D_{eff} $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Control	$1,7671 \times 10^{-9}$
Agua	$2,0222 \times 10^{-9}$
Vapor	$1,2277 \times 10^{-9}$
Microondas	$1,0723 \times 10^{-9}$

Los datos de MR se ajustaron a los modelos matemáticos reportados en la Tabla 2, mientras que las constantes k , n , a , b y c se reportaron en la Tabla 9, junto con el análisis de bondad de ajuste (coeficiente de determinación, error cuadrático medio y error absoluto medio). Según Erbay & Icier, (2010), la constante k describe la velocidad de secado y el resto de constantes revelan datos importantes. Al referirse a cinco ecuaciones semiteóricas y empíricas (Ec.10), la presencia del error se reduce debido a menos suposiciones, siempre y cuando se mantengan a condiciones experimentales detallados (secado por aire convectivo a 65°C) (Inyang et al., 2018).

Tabla 9.

Parámetros obtenidos en el modelado de la cinética de secado de las láminas de col.

Modelo	Variable	Control	Agua	Vapor	Microondas
Newton	$k [h^{-1}]$	1,1882	1,1347	0,5983	0,6047
	R^2	0,9931	0,9932	0,9945	0,9867
	$RMSE$	0,0763	0,0811	0,0645	0,0763
	MAE	0,0559	0,0583	0,0528	0,0543
Page	$k [h^{-1}]$	0,9346	0,4528	0,5146	0,4528
	n	1,1120	1,2446	1,0630	1,2446
	R^2	0,9935	0,9932	0,9996	0,9809
	$RMSE$	0,0075	0,0051	0,0099	0,0076
	MAE	0,0051	0,0035	0,0069	0,0051
Page Modificado	$k [h^{-1}]$	0,9409	0,9183	0,5351	0,5215
	n	1,1120	1,2446	1,0630	1,2446
	R^2	0,9895	0,9983	0,9940	0,9842
	$RMSE$	0,0076	0,0049	0,0095	0,0079
	MAE	0,0052	0,0037	0,0075	0,0051
Henderson y Pabis	a	1,7617	1,5847	1,2783	1,3251
	$k [h^{-1}]$	1,1905	1,1040	0,594	0,585
	R^2	0,9710	0,9900	0,9858	0,9781
	$RMSE$	0,0746	0,0305	0,0642	0,0763
	MAE	0,0543	0,0257	0,0526	0,0541
Logarítmico	a	0,9992	1,0503	1,0359	1,0236
	$k [h^{-1}]$	0,8346	0,9390	0,0474	0,4112
	c	0,0137	0,0044	0,0315	0,00559
	R^2	0,9915	0,9901	0,9879	0,9898
	$RMSE$	0,0759	0,0768	0,0210	0,0401
	MAE	0,0556	0,0540	0,0163	0,0305
Wang y Singh	a	0,3358	0,3178	0,3122	0,2886
	b	0,0316	0,0253	0,0254	0,0222
	R^2	0,7919	0,9697	0,970	0,9592
	$RMSE$	0,0531	0,0494	0,0331	0,0493
	MAE	0,0359	0,0360	0,0270	0,0359

Se observó que los modelos que se adaptan mejor a los datos experimentales son los de Page y Page Modificado, al presentar valores altos del coeficiente de determinación (R^2 : 0,9983-0,9996) y bajos del error cuadrático medio (RMSE) y del error absoluto medio (MAE). Los resultados adjuntos se asemejan a lo desarrollado por **Vega-Galvez et al. (2024)**, donde se obtuvieron valores de R^2 del orden de 0,989, para una muestra de col roja secada en rangos desde 50 a 90 °C. Por otro lado, el modelo de Wang y Sing, es el que presenta los peores ajustes, debido a la naturaleza cuadrática generando parábolas donde los vértices son negativos. **Tao et al. (2019)**, mencionan que dichas ecuaciones polinómicas no describen la pérdida de agua para col blanca col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.).

Para los datos de k se consideró los modelos semiteóricos que estén basados en la ley de enfriamiento de Newton y la segunda Ley de Fick para la difusión, generando valores altos en el matriz de control (1,1882 - 1,1905 h⁻¹). Según lo reportado por **Vega-Galvez et al. (2024)**, dicho valor aumenta con las láminas de col debido a un estado más natural de las hojas junto al incremento de temperatura. Compartiendo características con lo reportado por **Vega-Galvez et al. (2024)**, donde al experimentar con un rango de 50 a 70 °C en *Brassica oleracea* var. *Capitata f. rubra*, donde se extrajeron valores de 1,2708 h⁻¹ y 1,3032 respectivamente h⁻¹, (**Vega-Galvez et al., 2024**).

Mientras que la variable n ‘exponente de secado’, fue obtenida mediante los modelos de Page y Page modificado. En el caso de **Page (1949)**, esta constante es una herramienta adimensional para el ajuste. En todas las muestras se observa valores mayores a la unidad (Tabla 9), reflejando un comportamiento difusivo (**Li et al., 2022**). Los valores tienen relación con lo reportado por **Vega-Galvez et al. (2024)**, en *Brassica oleracea* var. *capitata f. rubra* durante el periodo de secado entre los 60 y 70 °C.

Para las constantes restantes de las ecuaciones (a , b y c), según lo reportado por **Erbay & Icier (2010)**, el valor de a debe ser próximo a la unidad y esto se consiguió en los modelos Logarítmico y Henderson y Pabis ($MR_0 \neq 1,0000$). La constante c representa que existe una tasa tipo residual que no se elimina completamente ($MR_f \neq 0,000$). No obstante, esta constante no suele tener un significado físico dado que se fundamenta solamente de forma teórica (**Inyang et al., 2018**).

3.1.5 Isotermas de adsorción

La Figura 9, muestra la relación entre la actividad de agua (a_w) y el contenido de humedad final (x_e) de las harinas obtenidas posterior al uso de los cuatro pretratamientos ya mencionados. Estas curvas sigmoideas reflejan isotermas del tipo II (ver Figura 5), características de materiales no porosos o macroporosos, en los que la adsorción se da en mono- y multicapa.

Investigaciones desarrolladas por **Alhamdan & Alsadon (2004)**; **Bernstein & Zapata Noreña (2015)**, mencionan que existen las isotermas obtenidas de tipo II en el desarrollo de harinas a partir de Brassicas, reforzando una matriz macroscópica e hidrofóbica. Lo que infiere que adhesión de partículas de agua en la superficie es complicada, pero en gracias a su estructura de poros grandes permite una absorción de humedad en las capas (**Pääkkönen & Plit, 1991**).

La generación de esta clase de curvas es característica de los alimentos secos, donde es posible identificar regiones de sorción de agua, donde, la primera está en el inicio al punto B ($a_w < 0,2$) reflejando adsorción monomolecular (x_m). En contraste, las siguientes regiones dos ($0,2 < a_w < 0,6$) y tres ($a_w > 0,6$), la humedad y el agua se pueden adherir en capas adicionales y condensar en poros del material (Alzate et al., 2003; Ayala-Aponte & Clave, 2011). Mediante el cual se refleja que es un proceso lento al inicio; no obstante, a medida que se produce una infiltración de agua en el resto de las capas de la materia, se observa un aumento.

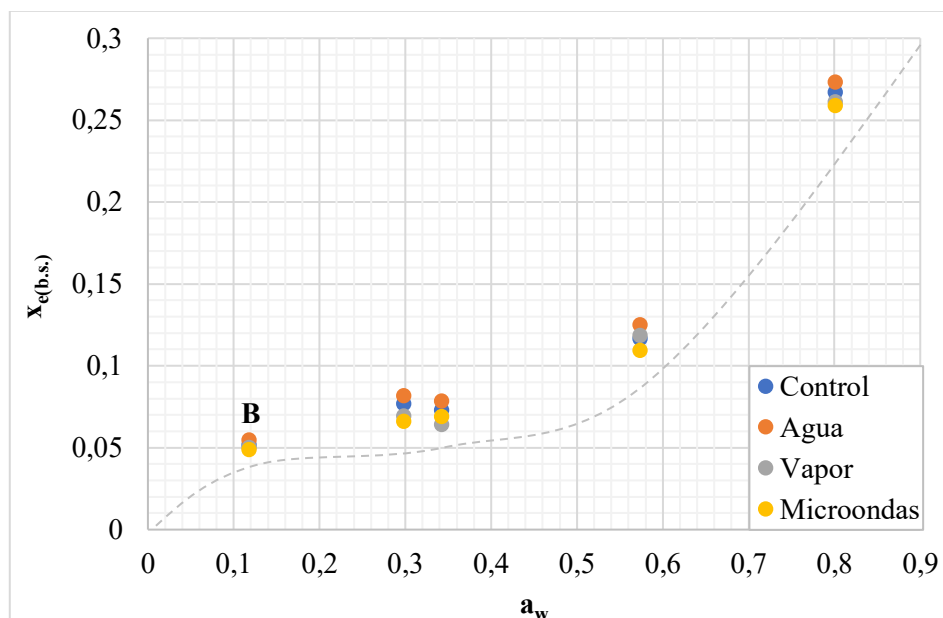


Figura 9. Isothermas de adsorción de muestras de harinas de residuos de col sometidas a diferentes pretratamientos.

La Figura 10 muestra cada isoterma correspondiente a cada pretratamiento. Se observa que a humedades relativas elevadas (60 – 80%), las muestras tienden a una mayor absorbancia de agua (0,15 kg agua/kg sólidos secos y 0,30 kg agua/kg sólidos secos, respectivamente), lo que sugiere una capacidad de adsorción de humedad por parte de los alimentos deshidratados hasta llegar a un equilibrio (Baptistini et al., 2017). Tanto la muestra control (Figura 10A), como la pretratada con agua hirviendo (Figura 10B) presentan valores altos de x_e , reflejando una estabilidad que puede perderse y como consecuencia son propensos a la proliferación de microorganismos (Vega & Lemus, 2005) y para que una harina se conserve en forma óptima, es necesario que las humedades relativas sean inferiores al 60%.

La harina de col que sufrió el pretratamiento de vapor presentó grumos más notorios y una tonalidad más oscura, en contraste con la muestra control. Como lo menciona Casp Vanaclocha & Abril Requena (2003), esto se debe a que el proceso de secado genera una serie de reacciones que alteran la característica plástica de los productos. Así, cuando se almacenan a mayores humedades relativas, se presentan los cambios en la tonalidad (Pääkkönen & Plit, 1991).

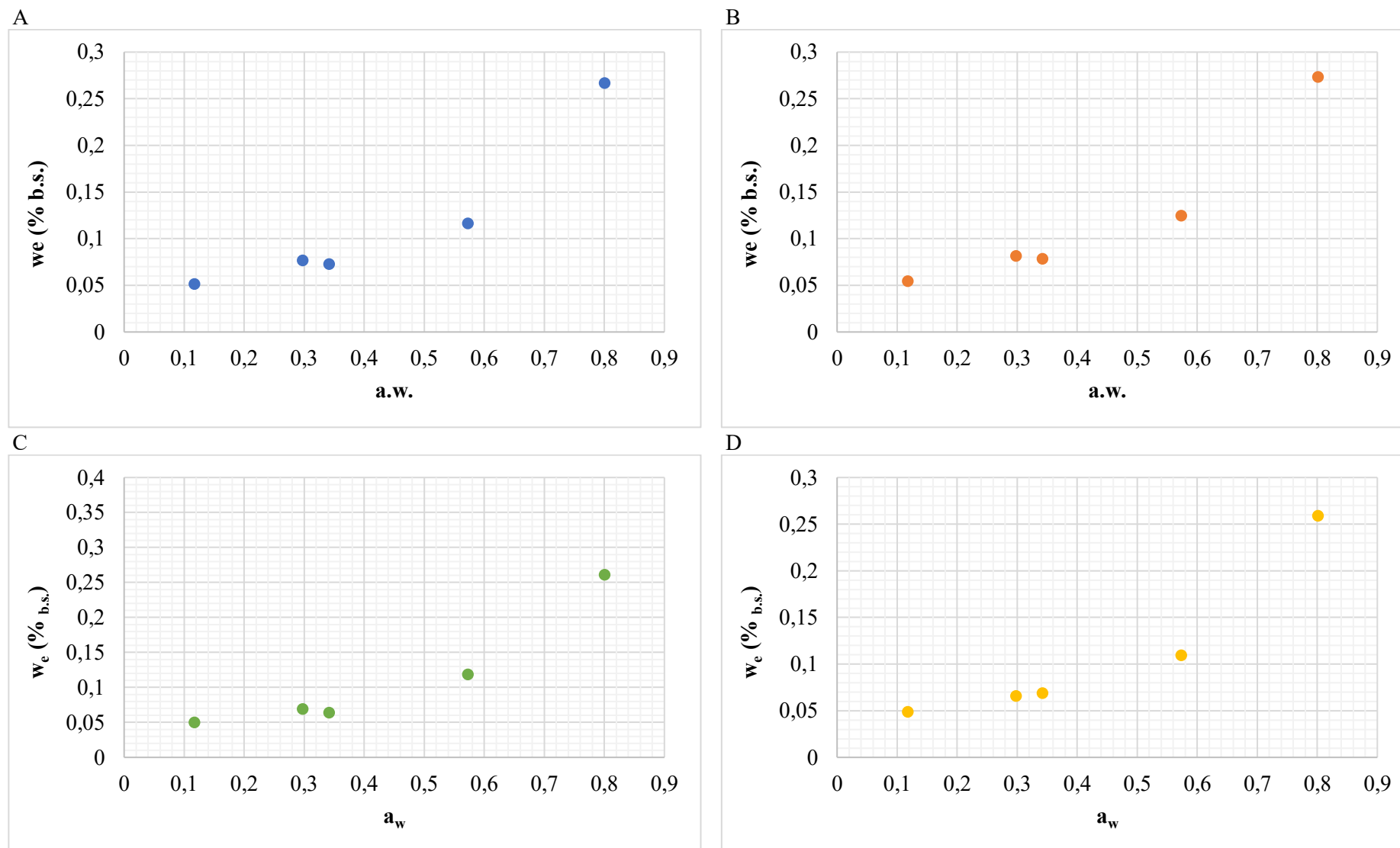


Figura 10. Curvas experimentales de las isothermas de adsorción de las harinas de col.

Nota. (A) Muestra control, (B) Agua, (C) Vapor y (D) Microondas.

3.1.6 Modelado matemático de las isotermas de adsorción

Se tomaron los modelos matemáticos de BET y GAB (Ec. 1 y 2), con ello se correlacionó la actividad de agua de diferentes ambientes expuestos, para lograr llegar a una humedad en equilibrio con las harinas de residuos de col. Los valores obtenidos son reportados en la Tabla 11. Se reporta el calor de sorción (C_{BET} y C_{GAB}) y la humedad de monocapa (x_m). Según lo reportado por **Timmermann (2003)**, es una señal de la cantidad de agua en la superficie junto a la energía de las interacciones.

Tabla 10.

Parámetros obtenidos mediante el modelado de las isotermas de adsorción de harinas de col.

Parámetro	Control	Agua	Vapor	Microondas
BET				
x_m [kg agua/kg sólidos secos]	0,0514	0,0554	0,0439	0,0466
C_{BET}	79,4546	61,5691	89,3726	97,8810
R^2	0,9718	0,9763	0,9675	0,9988
GAB				
x_m [kg agua/kg sólidos secos]	0,0630	0,0617	0,0733	0,0454
C_{GAB}	75,8635	53,0761	55,4132	80,6067
K_{GAB}	1,1379	1,1173	1,0528	1,0388
R^2	0,9674	0,9727	0,9409	0,9980

Nota. El modelo de BET se ajustó únicamente al rango de a_w recomendado.

Los modelos descritos presentan coeficientes de determinación altos (R^2 : 0,96-0,99). La investigación desarrollada por **Bernstein & Noreña (2015)**, en este tipo de col presentan una correlación mayor a la visualizada en este estudio. La literatura científica explica que esta clase de modelos presentan un rango efectivo de ajuste entre $0,05 < a_w < 0,35$; mientras que para el modelado GAB, refleja una mayor cantidad de datos, dado que su alcance de datos es más amplio, evitando lo máximo posible la presencia de errores (**Timmermann, 2003**).

El parámetro K_{GAB} , se relaciona con las constantes de los modelos descritos, dado que demuestra una similitud entre las energías de las capas adicionales y el agua o la humedad en su estado más puro. La muestra control y la pretratada con vapor presentan valores elevados de (1,0388 y 1,1379, respectivamente), lo que evidencia una mayor movilidad, debido a que la materia no se encuentra tan unida a la monocapa, pero tampoco están lo suficientemente libre (**Quirijns et al., 2005**).

CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El secado de los residuos de col (*Brassica oleracea* var. *Capitata* L.) con aire caliente a 65°C durante un periodo de ocho horas, presentó una reducción de más del 80% de la humedad inicial, alcanzando una humedad crítica de 2,68 kg_{agua}/kg_{sólidos secos} y una humedad en equilibrio de 0,04 kg_{agua}/kg_{sólidos secos}, lo que confirma que el proceso fue eficiente para la deshidratar los residuos.
- El análisis matemático evidenció un mejor ajuste con los modelos de Page y Page modificado, con coeficientes de correlación entre 0,9867 y 0,9945, así como error cuadrático medio entre 0,0645 y 0,0811 y error absoluto medio entre 0,0528 y 0,0583, lo que confirma su capacidad predictiva superior frente a otros modelos evaluados. En cuanto a las constantes, la muestra tratada con microondas presentó el valor más alto de k (1,0019 h⁻¹), lo que indica una mayor velocidad de secado, y uno de los valores más bajos de n (1,0741), lo cual coincide con un proceso de deshidratación más eficiente.
- Al aplicar la Segunda Ley de Difusión de Fick, se obtuvieron coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) entre $1,07 \times 10^{-9}$ y $2,02 \times 10^{-9}$ m²/s, valores que se encuentran dentro del rango típico para matrices vegetales, lo que demuestra que los pretratamientos aumentan la difusividad y reducen la energía de activación del secado.
- Las isothermas de adsorción confirmaron un comportamiento tipo II, típico de matrices vegetales ricas en compuestos hidrofílicos. Los modelos BET y GAB presentaron ajustes adecuados, con parámetros de monocapa entre 0,0439 y 0,0733 g_{agua}/g_{sólidos secos}, mientras que las constantes asociadas al calor de sorción (C_{BET} entre 61,56 y 97,88) confirmaron una fuerte interacción agua–matriz, especialmente en muestras tratadas con microondas. Los valores de K_{GAB} fueron mayores que la unidad en algunas muestras (1,0388–1,1379), lo que indica una mayor movilidad del agua adsorbida, un fenómeno común en especies de Brassica. En conjunto, estos resultados confirman que la harina obtenida es estable, funcional y apta para su uso como ingrediente alimentario con valor agregado.

Recomendaciones

- Emplear el uso de sales higroscópicas que permitan establecer ambientes que sean fácilmente controlados y con humedades relativas de 40 a 80%, dado que al emplear con esta clase de rangos permite establecer una mejor adaptación y un acoplamiento más exacto de las isothermas de sorción en el modelado GAB.

- Examinar la factibilidad de usar harina obtenida en diversas preparaciones alimentarias, como pueden ser para repostería y panadería; con ello, para evaluar las propiedades tecno funcionales en sistemas reales; y también aportaría extraer información y compararla con sistemas reales dentro de la industria alimentaria y aprovechar el alimento alternativo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acurio, L., Baquerizo, A., Borja, A., Vayas, M., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., Igual, M., Acurio, L., Baquerizo, A., Borja, A., Vayas, M., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., & Igual, M. (2023). Water-Sorption Isotherms and Air-Drying-Kinetics Modelling of Andean Tubers and Tuberous Roots. *Biology and Life Sciences Forum 2023*, Vol. 26, 26(1), 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, 100752. <https://doi.org/10.1016/J.CRFS.2024.100752>
- Afolabi, T. J., Tunde-Akintunde, T. Y., & Adeyanju, J. A. (2014). Mathematical modeling of drying kinetics of untreated and pretreated cocoyam slices. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2731. <https://doi.org/10.1007/S13197-014-1365-Z>
- Alhamdan, A. M., & Alsadon, A. A. (2004). Moisture sorption isotherms of four vegetable seeds as influenced by storage conditions. *Acta Horticulturae*, 631, 63–70. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2004.631.7>
- Alzate, carlos eduardo orrego, Agudelo, lina M. grajales, & Perdomo, william a. cardona. (2003). Procesamiento de alimentos = [Food Processing]. *Procesamiento de Alimentos*, 296–297. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11607>
- Andersa, K. N., Mohammed, H. H., & Haji, A. (2025). Drying Characteristics, Color, and Functional and Chemical Properties of Figl (*Raphanus sativus* L.) Leaves and Petioles Under Convective Drying Conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2025(1), 4040817. <https://doi.org/10.1155/JFPP/4040817>
- Ayala-Aponte, A., & Clave, P. (2011). Estimación de las isoterma de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9(1), 88–96. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/761>
- Baptistini, F. M., Corrêa, P. C., de Oliveira, G. H. H., Cecon, P. R., & Soares, N. de F. F. (2017). Kinetic modeling of water sorption by roasted and ground coffee. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39(3), 273–281. <https://doi.org/10.4025/ACTASCIAGRON.V39I3.32576>
- Bas-Bellver, C., Barrera, C., Betoret, N., & Seguí, L. (2022). Impact of Disruption and Drying Conditions on Physicochemical, Functional and Antioxidant Properties of Powdered Ingredients

- Obtained from Brassica Vegetable By-Products. *Foods*, 11(22), 3663. <https://doi.org/10.3390/FOODS11223663/S1>
- Bernstein, A., & Noreña, C. P. Z. (2015). Encapsulation of red cabbage (*Brassica oleracea* L. Var. capitata L. f. rubra) anthocyanins by spray drying using different encapsulating agents. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 58(6), 944–952. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132015060226>
- Bernstein, A., & Zapata Noreña, C. P. (2015). Thermodynamic sorption of red cabbage extract (*Brassica oleracea* L. var. capitata L. f. rubra) encapsulated by spray drying. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8180. <https://doi.org/10.1007/S13197-015-1902-4>
- Casp Vanaclocha, A., & Abril Requena, J. (2003). *Proceso de conservación de alimentos* (Segunda, Vol. 2). Mundi-Prensa.
- Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion. In *The Mathematics of Diffusion: Vol. Second* (Second Edition, p. 69). Brunel University Unbrige.
- Donohue, M. D., & Aranovich, G. L. (1998). Classification of Gibbs adsorption isotherms. *Advances in Colloid and Interface Science*, 76–77, 137–152. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(98\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00044-X)
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010a). 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>
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010b). 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>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), & World Health Organization (WHO). (1985). *CODEX ALIMENTARIUS*.
- Gudiño, I., Casquete, R., Martín, A., Wu, Y., & Benito, M. J. (2024). Comprehensive Analysis of Bioactive Compounds, Functional Properties, and Applications of Broccoli By-Products. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 3918, 13(23), 3918. <https://doi.org/10.3390/FOODS13233918>
- Haw, Y. T., Sim, Y. Y., & Nyam, K. L. (2020). Effect of steam blanching and high temperature drying on the physicochemical properties, antioxidant activities and consumer acceptability of Hibiscus cannabinus leaves tea. *Journal of Food Science and Technology*, 57(12), 4588. <https://doi.org/10.1007/S13197-020-04497-0>

- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. In *Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials* (p. 169).
- Horwitz, William., & Latimer, G. (2006). *Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL* (G. Latimer, Ed.; 18th ed.). AOAC International.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos* (Mundi-Prensa). Mundi-Prensa Libros, s. a.
- Ignaczak, A., Salamon, A., Kowalska, J., Marzec, A., & Kowalska, H. (2023). Influence of Pre-Treatment and Drying Methods on the Quality of Dried Carrot Properties as Snacks. *Molecules*, 28(17), 6407. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28176407>
- Ihuaraqui, C., & Bardales, J. (2023). *Efecto de temperatura sobre la bixina evaluado mediante la cinética de secado e isothermas de adsorción de harina Bixa Orellana L. (ACHIOTE)*. Escuela Profesional de Ingeniería Alimentarias.
- Inyang, U. E., Oboh, I. O., Etuk, B. R., Inyang, U. E., Oboh, I. O., & Etuk, B. R. (2018). Kinetic Models for Drying Techniques—Food Materials. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 8(2), 27–48. <https://doi.org/10.4236/ACES.2018.82003>
- John, M. O., David, O. O., Mary, E. L., Joab, K. D., Olayinka, A. V., Sikiru, A. B., & Koura, B. I. (2023). Dried cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) waste meal decreases blood cholesterol but does not alter growth performance, and physiological indices of weaned pigs. *Veterinary and Animal Science*, 22, 100320. <https://doi.org/10.1016/J.VAS.2023.100320>
- Khater, E. S. G., Bahnasawy, A. H., Elwakeel, A. E., Tantawy, A. A., Elbeltagi, A., Salem, A., Marey, S. A., Okasha, A. M., & Metwally, K. A. (2025). Comparative analysis of drying kinetics, thermodynamic properties, and mathematical modeling of pomegranate peel (*Punica granatum* L.) in a hybrid solar dryer and an oven dryer. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 1–25. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11016-8>
- Lewicki, P. P. (1997). The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science and Technology*, 32(6), 553–557. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1997.TB02131.X>
- Li, W., Gou, G., He, Y., & Tan, S. (2022). Innovative air-impingement jet drying of red cabbage: Kinetic description and prediction of the degradation of cyanidin-3-diglucoside-5-glucoside and cyanidin. *Food Chemistry: X*, 15, 100422. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2022.100422>

Liou, Z., Alemán-Báez, J., Visser, R. G. F., & Bonnema, G. (2024). Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) Development in Time: How Differential Parenchyma Tissue Growth Affects Leafy Head Formation. *Plants*, 13(5), 656. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13050656/S1>

Luka, B. S., Mactony, M. J., Vihikwagh, Q. M., Oluwasegun, T. H., Zakka, R., Joshua, B., & Muhammed, I. B. (2024). Microwave-based and convective drying of cabbage (*Brassica oleracea* L. var capitata L.): Computational intelligence modeling, thermophysical properties, quality and mid-infrared spectrometry. *Measurement: Food*, 15, 100187. <https://doi.org/10.1016/J.MEAFOO.2024.100187>

Mabry, M. E., Turner-Hissong, S. D., Gallagher, E. Y., McAlvay, A. C., An, H., Edger, P. P., Moore, J. D., Pink, D. A. C., Teakle, G. R., Stevens, C. J., Barker, G., Labate, J., Fuller, D. Q., Allaby, R. G., Beissinger, T., Decker, J. E., Gore, M. A., & Pires, J. C. (2021). The Evolutionary History of Wild, Domesticated, and Feral *Brassica oleracea* (Brassicaceae). *Molecular Biology and Evolution*, 38(10), 4419–4434. <https://doi.org/10.1093/MOLBEV/MSAB183>

Madamba, P. S., Driscollb, R. H., & Buckleb, K. A. (1996). The Thin-layer Drying Characteristics of Garlic Slices. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 29).

Mahfoud, F., Frem, J., Assaf, J. C., Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S. A., Elias, R., Debs, E., & Louka, N. (2025). Evolution of Dried Food Texturization: A Critical Review of Technologies and Their Impact on Organoleptic and Nutritional Properties. *Processes* 2025, Vol. 13, Page 799, 13(3), 799. <https://doi.org/10.3390/PR13030799>

Maltini, E., Torreggiani, D., Venir, E., & Bertolo, G. (2003). Water activity and the preservation of plant foods. *Food Chemistry*, 82(1), 79–86. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00581-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00581-2)

Martínez-Navarrete, N., Andrés, A. M., Chiralt, A., & Fito, P. (1999). *Termodinámica y Cinética de Sistemas Alimento y Entorno*. 277–315, 319–342. https://books.google.com/books/about/Termodin%C3%A1mica_Y_Cin%C3%A9tica_de_Sistemas_A.html?hl=es&id=bLQ_Lj6C4p8C

Mejías, N., Vega-Galvez, A., Gomez-Perez, L. S., Pasten, A., Uribe, E., Cortés, A., Valenzuela-Barra, G., Camus, J., Delporte, C., & Bernal, G. (2024). Health-Promoting Properties of Processed Red Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata f. rubra): Effects of Drying Methods on Bio-Compound Retention. *Foods*, 13(6), 830. <https://doi.org/10.3390/FOODS13060830/S1>

Mohamadou, Y., Halidou, A., & Kapen, P. T. (2020). A review of mathematical modeling, artificial intelligence and datasets used in the study, prediction and management of COVID-19. *Applied Intelligence* 2020 50:11, 50(11), 3913–3925. <https://doi.org/10.1007/S10489-020-01770-9>

- Mojica, C., Acosta, D., Vidal, E., & Mojica, N. (2020). Isotermas de Secado en Condiciones de Laboratorio para Pulpa de Calabaza (Cucúrbita pepo). *TECTZAPIC*, 1–7.
- Nguyen, V. A., & Ramanathan, M. (2020). Application of Brunauer–Emmett–Teller (BET) theory and the Guggenheim–Anderson–de Boer (GAB) equation for concentration-dependent, non-saturable cell–cell interaction dose-responses. *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, 47(6), 561–572. <https://doi.org/10.1007/s10928-020-09708-x>
- Nzimande, N. A., Mianda, S. M., Seke, F., & Sivakumar, D. (2024). Impact of different pre-treatments and drying methods on the physicochemical properties, bioactive compounds and antioxidant activity of different tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars. *LWT*, 207, 116641. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116641>
- O’Callaghan, J. R., Menzies, D. J., & Bailey, P. H. (1971). Digital simulation of agricultural drier performance. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3), 223–244. [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(71\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(71)80016-1)
- Oliveira, S. M., Brandão, T. R. S., & Silva, C. L. M. (2016). Influence of Drying Processes and Pretreatments on Nutritional and Bioactive Characteristics of Dried Vegetables: A Review. In *Food Engineering Reviews* (Vol. 8, Issue 2, pp. 134–163). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s12393-015-9124-0>
- Overhults, D. G., White, G. M., Hamilton, H. E., & Ross, I. J. (1973). Drying Soybeans With Heated Air. *Transactions of the ASAE*, 16(1), 112–0113. <https://doi.org/10.13031/2013.37459>
- Ozcelik, M. M., Aydin, S., Aydin, E., & Ozkan, G. (2023). Preserving nutrient content in red cabbage juice powder via foam-mat hybrid microwave drying: Application in fortified functional pancakes. *Food Science & Nutrition*, 12(2), 1340. <https://doi.org/10.1002/FSN3.3847>
- Pääkkönen, K., & Plit, L. (1991). Equilibrium Water Content and the State of Water in Dehydrated White Cabbage. *Journal of Food Science*, 56(6), 1597–1599. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.1991.TB08649.X;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Page, G. E. (1949). Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in thin Layers. *Theses and Dissertations Available from ProQuest*. <https://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI1300089>
- Paul Singh, R., & Heldman, D. R. (2008). *Introduction to Food Engineering, Fourth Edition* (Steve L. Taylor, Ed.; Spanish, Trans.; Four Edition).

- Quirijns, E. J., Van Boxtel, A. J. B., Van Loon, W. K. P., & Van Straten, G. (2005). Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(11), 1805–1814. <https://doi.org/10.1002/JSFA.2140;CTYPE:STRING:JOURNAL>
- Razzak, A., Mahjabin, T., Khan, M. R. M., Hossain, M., Sadia, U., & Zzaman, W. (2023). Effect of cooking methods on the nutritional quality of selected vegetables at Sylhet City. *Heliyon*, 9(11), e21709. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E21709>
- Riaz, N., Sultan, M., Noor, S., Sajjad, U., Farooq, M., Khan, M. U., Hanif, S., & Riaz, F. (2022). Recent developments in adsorption heat pumps for heating applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(4). <https://doi.org/10.1177/16878132221089444;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Ruiz Espejo, M. (2017). *Estimación de la desviación estándar* (Español, Trans.; Vol. 59).
- Saravacos, G. D., & Maroulis, Z. B. (2011). *Food Process Engineering Operations* (D.-W. Sun, Y.-J. Cho, & S. Kang, Eds.). <http://www.ucd.ie/sun/>
- Sarkar, A., Rahman, S., Roy, M., Alam, M., Hossain, M. A., & Ahmed, T. (2021). Impact of blanching pretreatment on physicochemical properties, and drying characteristics of cabbage (*Brassica oleracea*). *Food Research*, 5(2), 393–400. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(2\).556](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(2).556)
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2015). *Harina de Trigo. Requisitos*.
- Singh, R. P., Heldman, D. R., & Erdogan, F. (2024). Introduction to Food Engineering. *Introduction to Food Engineering*, 1–913. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02802-6>
- Song, C., Ye, X., Liu, G., Zhang, S., Li, G., Zhang, H., Li, F., Sun, R., Wang, C., Xu, D., & Zhang, S. (2023). Comprehensive Evaluation of Nutritional Qualities of Chinese Cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*) Varieties Based on Multivariate Statistical Analysis. *Horticulturae* 2023, Vol. 9, Page 1264, 9(12), 1264. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE9121264>
- Srimagal, A. (2016). *Effects of Pre-treatments on Drying Characteristics of Bitter gourd*.
- Statilko, O., Tsiaka, T., Sinanoglou, V. J., & Strati, I. F. (2024). Overview of Phytochemical Composition of *Brassica oleracea* var. *capitata* Cultivars. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 3395, 13(21), 3395. <https://doi.org/10.3390/FOODS13213395>
- Ştefan, I. M. A., & Ona, A. D. (2020). Cabbage (*Brassica Oleracea* L.). overview of the HEALTH Benefits and Therapeutical uses. *Hop and Medicinal Plants*, 28(1–2), 150–169. <https://doi.org/10.15835/HPM.V28I1-2.13994>

- Tao, Y., Han, M., Gao, X., Han, Y., Show, P. L., Liu, C., Ye, X., & Xie, G. (2019). Applications of water blanching, surface contacting ultrasound-assisted air drying, and their combination for dehydration of white cabbage: Drying mechanism, bioactive profile, color and rehydration property. *Ultrasonics Sonochemistry*, 53, 192–201. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2019.01.003>
- Tiliwa, E. S., Boateng, I. D., Zhou, C., & Xu, B. (2023). Role of Drying Technologies on the Drying Kinetics, Physical Quality, Aroma, and Enzymatic Activity of Pineapple Slices. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 15906, 15(22), 15906. <https://doi.org/10.3390/SU152215906>
- Timmermann, E. O. (2003). Multilayer sorption parameters: BET or GAB values? *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 220(1–3), 235–260. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(03\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(03)00059-1)
- Timmermann, E. O., Chirife, J., & Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, 48(1), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00139-4)
- Uuh-Narvaez, J. J., & Segura-Campos, M. R. (2021). Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata): A food with functional properties aimed to type 2 diabetes prevention and management. In *Journal of Food Science* (Vol. 86, Issue 11, pp. 4775–4798). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15939>
- Valentas, K. J., Rotstein, Enrique., & Singh, R. Paul. (1997). *Handbook of food engineering practice* (Kenneth J. Valentas, Enrique Rotstein, & R. Paul Singh, Eds.). CRC Press.
- Vázquez, J., Piloni, J., Quintero, A., Soto, S., Ocampo, J., & González, L. (2024). *Caracterización físicoquímica, compuestos bioactivos, actividad antioxidante y su comportamiento durante la digestión in vitro de harina de col morada (Brassica oleracea var. capitata f. rubra)*. 1. <https://doi.org/doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101010>
- Vega, A., Lara, E., & Lemus, R. (2006). *Isotermas de Adsorción en Harina de Maíz (Zea mays L.)*. 1–8. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=395940080017>
- Vega, A., & Lemus, R. (2005). Importancia de las Isotermas en los Alimentos. *Revista Industrial*, 71.
- Vega-Galvez, A., Gomez-Perez, L. S., Ah-Hen, K. S., Zepeda, F., García-Segovia, P., Bilbao-Sainz, C., Mejías, N., & Pasten, A. (2024). Convective Hot Air Drying of Red Cabbage (*Brassica oleracea* var. Capitata Rubra): Mathematical Modeling, Energy Consumption and Microstructure. *Processes*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/pr12030509>

- Vega-Galvez, A., Gomez-Perez, L. S., Zepeda, F., Vidal, R. L., Grunenwald, F., Mejías, N., Pasten, A., Araya, M., & Ah-Hen, K. S. (2023). Assessment of Bio-Compounds Content, Antioxidant Activity, and Neuroprotective Effect of Red Cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata rubra*) Processed by Convective Drying at Different Temperatures. *Antioxidants*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/antiox12091789>
- Singh, R. P., & Wang, C. Y. (1978). *A Single Layer Drying Equation for Rough Rice*. *ASAE*, 3001. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3958192>
- Wang, H., Huang, G., & Zhang, X. (2025). Analysis and properties of polysaccharides extracted from *Brassica oleracea* L. var. *capitata* L. by hot water extraction/ultrasonic-synergistic enzymatic method. *Ultrasonics Sonochemistry*, 114, 107244. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2025.107244>
- Xu, Y., Xiao, Y., Lagnika, C., Li, D., Liu, C., Jiang, N., Song, J., & Zhang, M. (2020). A comparative evaluation of nutritional properties, antioxidant capacity and physical characteristics of cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata* var L.) subjected to different drying methods. *Food Chemistry*, 309, 124935. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.06.002>
- Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F. (1999). *Drying Characteristics of Laurel Leaves Under Different Drying Conditions*. Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy.
- Yue, Z., Zhang, G., Wang, J., Wang, J., Luo, S., Zhang, B., Li, Z., & Liu, Z. (2024). Comparative study of the quality indices, antioxidant substances, and mineral elements in different forms of cabbage. *BMC Plant Biology* 2024 24:1, 24(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-04857-4>
- Zagaceta, M. T., Palma, R., Aguilar, K. A., Fernández-Muñoz, J. L., Zagaceta, M. T., Palma, R., Aguilar, K. A., & Fernández-Muñoz, J. L. (2020). Efecto del tiempo de reposo en la cinética de deshidratación de los granos de maíz nixtamalizados. *Información Tecnológica*, 31(3), 149–158. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000300149>
- Zannini, E.; Bravo Núñez, Á.; Sahin, A. W.; Arendt, E. K.; Aiello, F.; Carullo, G.; Zannini, E.; Bravo Núñez, Á., Sahin, A. W., & Arendt, E. K. (2022). Arabinoxylans as Functional Food Ingredients: A Review. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 1026, 11(7), 1026. <https://doi.org/10.3390/FOODS11071026>
- Zhao, X., Wei, X., Wang, H., Liu, X., Zhang, Y., & Zhang, H. (2023). Discrepancy of Effective Water Diffusivities Determined from Dynamic Vapor Sorption Measurements with Different Relative

Humidity Step Sizes: Observations from Cereal Materials. *Foods*, 12(7), 1470.
<https://doi.org/10.3390/FOODS12071470>