



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**



**FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA**

**CARRERA DE ALIMENTOS**

---

**Tema:** Determinación del calor isostérico de adsorción de agua de harinas obtenidas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col.

---

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:** Johnny Paúl Salgado Rivera

**Tutor:** Dra. Liliana Patricia Acurio Arcos

**Ambato - Ecuador**

**Julio - 2026**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

Dra. 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, 01 de junio de 2026



---

Dra. Liliana Patricia Acurio Arcos

18XXXXXX88

**TUTOR**

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Johnny Paúl Salgado Rivera, 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.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Johnny Paúl Salgado Rivera', is centered on the page.

---

Johnny Paúl Salgado Rivera

18XXXXXX47

**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.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Johnny Paúl Salgado Rivera', is centered on the page.

---

Johnny Paúl Salgado Rivera

18XXXXXX47

**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:



Validar únicamente en FirmaEC.  
Firmado electrónicamente por:  
**DIEGO MANOLO  
SALAZAR GARCÉS**

---

Presidente del Tribunal



Validar únicamente en FirmaEC.  
Firmado electrónicamente por:  
**DANIEL ALFONSO  
CABRERA VALLE**

---

Mg. Daniel Alfonso Cabrera Valle

18XXXXXXX95



Validar únicamente en FirmaEC.  
Firmado electrónicamente por:  
**GABRIELA ELENA  
VIZUETE FIALLOS**

---

Mg. Gabriela Elena Vizúete Fiallos

17XXXXXXX13

Ambato, 19 de junio de 2026

## DEDICATORIA

*Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por haberme dado la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional. Su guía me permitió mantenerme firme incluso en los momentos de dificultad y cansancio.*

*A mis padres, quienes, con su amor, apoyo, esfuerzo y sacrificio, han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por creer siempre en mí, por cada consejo, por cada palabra de aliento y por brindarme su confianza para luchar por mis sueños. Este logro también les pertenece, porque sin su apoyo incondicional no habría sido posible alcanzar esta meta*

*A mi abuelita, por acompañarme a distancia durante todo este proceso académico, por comprender mis ausencias, mis preocupaciones y los momentos que no he podido pasar con ella, y por ofrecerme siempre ánimo y confianza para continuar.*

*A mi novia, por su amor, paciencia y apoyo incondicional en cada etapa de este camino, desde el principio hasta el fin. Gracias por acompañarme en los momentos difíciles, por motivarme a seguir adelante y por creer siempre en mí. Tu compañía y tus palabras de aliento fueron fundamentales para alcanzar este logro. Solo tú sabías de algunos momentos de esfuerzo y días de cansancio que nadie más conocía, pero tú estabas ahí para resolver todos mis problemas en un solo segundo.*

*A mis amigos, quienes estuvieron presentes en esta etapa compartiendo experiencias, risas, aprendizajes y momentos inolvidables que hicieron este camino más llevadero y significativo. A mis mascotas, por acompañarme con su amor sincero, alegría y compañía incondicional durante este camino, brindándome momentos de calma y felicidad en los días más difíciles.*

*Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación personal y profesional, motivándome constantemente a crecer, superarme y nunca rendirme ante las dificultades.*

***“La recompensa de nuestro trabajo no es lo que obtenemos, si no en lo que nos convertimos”***

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a Dios, por concederme la sabiduría, la fortaleza y la perseverancia necesarias para enfrentar cada reto presentado durante este camino, permitiéndome superarlos con fe, esfuerzo y dedicación.

A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, por haberme brindado la oportunidad de formarme académica y profesionalmente, proporcionándome los conocimientos, espacios y recursos necesarios para mi crecimiento.

A mi directora de tesis, Liliana Acurio Ph.D., por su orientación permanente, apoyo incondicional y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. Agradezco, además de su profesionalismo, su calidad humana, paciencia y compromiso a lo largo de todo este proceso.

A mis padres, Walter Salgado y Nancy Rivera, por su amor, sacrificio y respaldo constante en cada etapa de mi vida. Gracias por darme la oportunidad de completar mi formación profesional y por motivarme siempre a seguir con firmeza hacia mis metas.

A mi novia, por su apoyo incondicional en cada una de las etapas que he transcurrido en mi formación académica, por su ayuda y la confianza depositada en mí.

A todas las personas que me acompañaron durante mi carrera universitaria y que, de una u otra forma, contribuyeron a mi crecimiento personal y académico.

Finalmente, agradezco a todos quienes formaron parte de este proceso y dejaron una huella significativa en mi vida.

**¡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 .....                                                                                                                                                   | 1    |
| 1.2    Objetivos.....                                                                                                                                                                   | 12   |
| 1.2.1    Objetivo General .....                                                                                                                                                         | 12   |
| 1.2.2    Objetivos Específicos .....                                                                                                                                                    | 12   |
| CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA.....                                                                                                                                                          | 13   |
| 2.1 Materiales .....                                                                                                                                                                    | 13   |
| 2.2 Métodos .....                                                                                                                                                                       | 14   |
| 2.2.1 Elaboración de harinas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col sometidos a diferentes pretratamientos.....                                                                | 14   |
| 2.2.2 Construcción de las isothermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas a diferentes temperaturas, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos ..... | 17   |
| 2.2.3 Cálculo del calor isostérico neto de adsorción de agua a partir de las isothermas experimentales .....                                                                            | 18   |
| CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                                                             | 20   |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Análisis y discusión de los resultados .....                                                  | 20 |
| 3.1.1 Actividad de agua ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%H) previos y posterior al secado ..... | 20 |
| 3.1.2 Rendimiento del secado y de la molienda como indicadores tecnológicos.....                  | 23 |
| 3.1.3 Isotermas de adsorción de agua a 20, 30 y 40 °C .....                                       | 25 |
| 3.1.4 Calor isostérico neto de adsorción.....                                                     | 37 |
| 3.1.5 Comparativa entre brócoli, coliflor y col.....                                              | 43 |
| 3.1.6 Implicaciones para almacenamiento, envase y vida útil .....                                 | 44 |
| CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                | 46 |
| 4.1. Conclusiones.....                                                                            | 46 |
| 4.2. Recomendaciones.....                                                                         | 47 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                | 48 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Materiales y equipos necesarios para la realización del proyecto de investigación. ....                                                       | 13 |
| <b>Tabla 2 .</b> Soluciones salinas saturadas para determinar las isothermas de adsorción.....                                                                | 18 |
| <b>Tabla 3.</b> Fórmulas utilizadas para el cálculo del calor isostérico de adsorción.....                                                                    | 19 |
| <b>Tabla 4.</b> Actividad de agua ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%H) de las crucíferas antes del secado. ..                                                | 20 |
| <b>Tabla 5 .</b> Actividad de agua ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%H) de las crucíferas después del secado.<br>.....                                       | 22 |
| <b>Tabla 6.</b> Rendimiento del proceso de secado de las muestras de brócoli, coliflor y col. ....                                                            | 24 |
| <b>Tabla 7.</b> Rendimiento del proceso de molienda de las muestras de brócoli, coliflor y col. ....                                                          | 25 |
| <b>Tabla 8.</b> Contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) en función de $a_w$ de crucíferas sometidas a diferentes<br>tratamientos térmicos a 20 °C. ....  | 28 |
| <b>Tabla 9.</b> Contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) en función de $a_w$ de crucíferas sometidas a diferentes<br>tratamientos térmicos a 30 °C. ....  | 32 |
| <b>Tabla 10.</b> Contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) en función de $a_w$ de crucíferas sometidas a diferentes<br>tratamientos térmicos a 40 °C. .... | 35 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Tipos de isothermas de adsorción. ....                                                                           | 10 |
| <b>Figura 2.</b> Muestras de brócoli antes y después de los diferentes pretratamientos. ....                                      | 14 |
| <b>Figura 3.</b> Muestras de coliflor antes y después de los diferentes pretratamientos. ....                                     | 15 |
| <b>Figura 4.</b> Muestras de col antes y después de los diferentes pretratamientos. ....                                          | 15 |
| <b>Figura 5.</b> Isothermas de adsorción de agua en harinas de crucíferas sin pretratamiento (control) 20 °C. ....                | 29 |
| <b>Figura 6.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a ebullición a 20 °C. .                       | 29 |
| <b>Figura 7.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a vapor a 20 °C. ....                         | 29 |
| <b>Figura 8.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a microondas a 20 °C.                         | 30 |
| <b>Figura 9.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sin pretratamiento (control) a 30 °C. ....              | 33 |
| <b>Figura 10.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a ebullición a 30 °C.                        | 33 |
| <b>Figura 11.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a vapor a 30 °C. ....                        | 33 |
| <b>Figura 12.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a microondas a 30 °C. ....                   | 34 |
| <b>Figura 13.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sin pretratamiento (control) a 40 °C. ....             | 36 |
| <b>Figura 14.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a ebullición a 40 °C.                        | 36 |
| <b>Figura 15.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a vapor a 40 °C. ....                        | 36 |
| <b>Figura 16.</b> Isothermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a microondas a 40 °C. ....                   | 37 |
| <b>Figura 17.</b> Calor isostérico neto de adsorción a diferentes contenidos de humedad en muestras control. ....                 | 39 |
| <b>Figura 18.</b> Calor neto de adsorción isostérico a diferentes contenidos de humedad en muestras sometidas a ebullición. ....  | 40 |
| <b>Figura 19.</b> Calor isostérico neto de adsorción a diferentes contenidos de humedad en muestras tratadas con vapor. ....      | 41 |
| <b>Figura 20.</b> Calor isostérico neto de adsorción a diferentes contenidos de humedad en muestras tratadas con microondas. .... | 42 |

## RESUMEN EJECUTIVO

La investigación se centra en la necesidad de aprovechar de manera más eficiente los residuos de brócoli, coliflor y col, pues si bien tienen valor nutricional y tecnológico, su alto contenido de humedad los hace vulnerables al deterioro. Teniendo esto en cuenta, se propuso transformar el residuo de estas tres crucíferas en una harina estable y evaluar su comportamiento de adsorción de agua. El método implicó la selección, lavado y corte de residuos vegetales, el uso de una muestra control y sus contramuestras con pretratamientos térmicos los cuales fueron: ebullición, vapor y microondas, y luego un secado por convección a 65 grados centígrados durante ocho horas. Luego las muestras fueron molidas, almacenadas y analizadas mediante la construcción de isothermas de adsorción a 20, 30 y 40 grados centígrados utilizando soluciones salinas saturadas y el método gravimétrico estático. El calor isostérico neto se calculó mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron. Los resultados mostraron que el secado redujo la actividad del agua por debajo de 0,60, lo que mejoró la estabilidad microbiológica. Las isothermas mostraron un comportamiento tipo III y la humedad de equilibrio aumentó con la actividad del agua. Además, el calor isostérico fue mayor a baja humedad y disminuyó al aumentar la humedad. Por ende, este tipo de harinas son una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos de crucíferas, siempre y cuando se controlen adecuadamente las condiciones de almacenamiento.

**Palabras clave:** isothermas de adsorción, harinas vegetales, residuos de crucíferas, actividad de agua, humedad de equilibrio.

## ABSTRACT

The research focuses on the need for more efficient use of broccoli, cauliflower, and cabbage waste. While these vegetables have nutritional and technological value, their high moisture content makes them vulnerable to spoilage. Therefore, the study proposed transforming the waste from these three cruciferous vegetables into a stable flour and evaluating its water adsorption behavior. The method involved selecting, washing, and cutting the vegetable waste, using a control sample and its counterparts with thermal pretreatments: boiling, steaming, and microwave drying, followed by convection drying at 65°C for eight hours. The samples were then ground, stored, and analyzed by constructing adsorption isotherms at 20, 30, and 40°C using saturated saline solutions and the static gravimetric method. The net isosteric heat was calculated using the Clausius-Clapeyron equation. The results showed that drying reduced water activity below 0.60, improving microbiological stability. Isotherms exhibited Type III behavior, and equilibrium moisture content increased with water activity. Furthermore, isosteric heat was highest at low moisture content and decreased with increasing moisture. Therefore, this type of flour is a viable alternative for utilizing cruciferous waste, provided that storage conditions are properly controlled.

**Keywords:** adsorption isotherms, plant flours, cruciferous waste, water activity, equilibrium moisture content.

## **CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Antecedentes investigativos**

#### **1.1.1 Justificación**

La producción de crucíferas, como brócoli, coliflor y col, representa una de las actividades agrícolas más importantes en la región interandina, pero, al mismo tiempo, genera grandes cantidades de residuos agrícolas, principalmente en forma de tallos y hojas. En muchos casos estos residuos superan las 40 a 70 toneladas por hectárea (Risco et al., 2018). Estos desechos, al no ser aprovechados adecuadamente, terminan acumulándose en los campos o siendo descartados. Esto puede ocasionar problemas ambientales, como la proliferación de plagas y las emisiones de gases procedentes de su descomposición.

A nivel económico, este desaprovechamiento supone pérdidas de residuos con alto valor nutricional, que podrían destinarse a la elaboración de productos con valor agregado (Shinali et al., 2024). Una alternativa viable para darles uso a estos residuos es aprovecharlos para elaborar harinas que pueden emplearse como ingredientes funcionales en la industria alimentaria. Sin embargo, la estabilidad de estas harinas depende de su comportamiento frente a la humedad ambiental y de sus propiedades de adsorción (Bas-Bellver et al., 2025).

Por otro lado, la determinación del calor isostérico de adsorción de agua en harinas constituye uno de los parámetros fundamentales para comprender la interacción entre el agua y los componentes sólidos del alimento, ya que este parámetro refleja la energía que se necesita para que el agua se adsorba en la matriz del producto, hasta un contenido de humedad específico (Ahmed & Islam, 2018). Por ende, conocer este parámetro permite modelar con precisión las isotermas de adsorción y, a partir de ello predecir el comportamiento higroscópico de la harina bajo distintas condiciones de temperatura y humedad relativa (Ayala-Aponte, 2011).

Esta información es crucial para diseñar procesos de secado eficientes, definir condiciones de almacenamiento seguras y estimar la vida útil de los productos. En el caso de las harinas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col, la obtención de este parámetro impulsa el aprovechamiento tecnológico y refuerza la sostenibilidad en la cadena productiva agrícola.

#### **1.1.2 Fundamentación teórica**

##### **1.1.2.1 Materias primas: brócoli, coliflor y col**

Las materias primas consideradas en esta investigación pertenecen al grupo de las crucíferas, también conocidas como *Brassicaceae*, una familia de amplio interés alimentario, nutricional y agroindustrial.

Dentro de este grupo se encuentran el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), la coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) y la col o repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*), reconocidas por su aporte de fibra dietética, minerales, vitaminas y compuestos bioactivos. En los últimos años, las crucíferas han cobrado gran relevancia en el aprovechamiento de las partes no comerciales, como hojas externas, tallos, pecíolos, restos de inflorescencias y material descartado durante la selección poscosecha, que pueden transformarse en ingredientes más estables para procesos de deshidratación y molienda (Shinali et al., 2024).

Las crucíferas se caracterizan por contener compuestos azufrados, en especial los glucosinatos, que, al hidrolizarse, pueden formar isotiocianatos, moléculas asociadas con la actividad antioxidante. Según el estudio realizado por Ramírez-Pulido et al. (2021), estas hortalizas presentan compuestos fenólicos, flavonoides, carotenoides, tocoferoles y otros metabolitos secundarios que aumentan su valor nutricional y el de sus subproductos. La composición de cada crucífera dependerá de la especie, la variedad, la zona de cultivo, el estado de madurez, las condiciones de almacenamiento y el tratamiento tecnológico. Por esta razón, cuando los residuos de brócoli, coliflor y col se transforman en harinas o pulverizados, deben considerarse matrices vegetales complejas con capacidad de interacción con el agua, debido a su contenido de fibra y compuestos solubles.

#### **a. Generalidades de las crucíferas**

Desde el punto de vista agroindustrial, las crucíferas poseen una doble importancia. Por un lado, son alimentos de consumo frecuente y con reconocimiento nutricional; por otro, generan una fracción considerable de residuos durante la cosecha, el acondicionamiento, la comercialización y la preparación. Los residuos pueden incluir hojas que no cumplen con el estándar de calidad, tallos fibrosos, inflorescencias deformes, raíces, partes sobre maduras y material afectado por daños mecánicos, físicos y biológicos. Aunque estos subproductos suelen destinarse a compostaje, alimentación animal o descarte, Bas-Bellver et al. (2025), señalan que los mismos continúan siendo ricos en biomoléculas de interés y pueden emplearse como ingredientes funcionales, polvos vegetales, extractos antioxidantes y fuentes de fibras.

##### **a.1. Brócoli**

El brócoli es una hortaliza de inflorescencia verde que se consume principalmente en floretes, aunque el tallo y las hojas representan el 60 % de la porción total de la hortaliza; por ende, la parte comercial suele ser menor que la planta completa. En términos tecnológicos, estos residuos resultan de interés por contener fibra insoluble, proteínas vegetales, minerales y compuestos bioactivos, como los glucosinatos y los compuestos fenólicos.

Estudios recientes de Khaled et al. (2025), han demostrado que los descartes de brócoli pueden transformarse en polvos mediante secado con aire caliente o liofilización, obteniéndose así ingredientes con actividad antioxidante y potencial como subproductos funcionales.

### ***a.2. Coliflor***

La coliflor presenta una inflorescencia compacta de color blanco o crema, rodeada de hojas verdes que, por lo general, se eliminan antes de la comercialización o el consumo. Estas hojas y recortes constituyen un residuo abundante con una composición rica en fibra dietética, proteínas, minerales y antioxidantes. La coliflor, al igual que otras *Brassicas*, posee una alta humedad inicial, lo que la vuelve perecedera y susceptible al deterioro microbiano y enzimático. Por ello, la deshidratación y la molienda se plantean como la mejor alternativa para estabilizar sus residuos y convertirlos en harinas con una mayor utilidad y menos propensas al deterioro, siempre y cuando se controle adecuadamente la actividad de agua ( $a_w$ ) (Kovačević & Putnik, 2022).

### ***a.3. Col***

La col o repollo se caracteriza por su estructura de hojas superpuestas, con hojas externas que, por lo general, se descartan durante el acondicionamiento. Dichas hojas, aunque en ocasiones presentan defectos visuales, pueden contener compuestos fenólicos, pigmentos, fibras y compuestos azufrados (Uddin et al., 2025). La transformación de residuos de la col en un pulverizado vegetal permite reducir su volumen, facilitando así su transporte y la generación de subproductos que pueden utilizarse en formulaciones alimentarias. Estudios recientes realizados por Dubrovskaja et al. (2026), evidenciaron que los pulverizados de col blanca y de diferentes crucíferas indican que estos subproductos pueden conservar compuestos fenólicos tras ser sometidos a distintos pretratamientos y procesos tecnológicos.

## **1.1.2.2 Producción de crucíferas en Ecuador y generación de residuos**

### ***a. Producción de brócoli en Ecuador***

En Ecuador, el brócoli, la coliflor y la col, son hortalizas que representan la mayor producción en la economía de la Sierra, tanto por su consumo interno como por su orientación a la exportación. De acuerdo con la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), la producción nacional de brócoli alcanzó alrededor de 197.221 toneladas y un rendimiento de 20,02 t/ha (INEC, 2024). Las provincias con mayor producción fueron Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Pichincha, destacándose, dentro de esta lista, Cotopaxi con 130.385 toneladas y Tungurahua con 60.079 toneladas (MAG, 2024). Estos datos sirven como evidencia de que esta crucífera posee una base productiva significativa y que, por la misma cultura de cultivo masiva, genera una gran cantidad de residuos no comerciales.

### ***b. Producción de coliflor y col en Ecuador***

La coliflor y la col forman parte de las hortalizas cultivadas en las zonas más templadas y de altura, con una participación mayoritaria en los mercados locales, ferias, supermercados y cadenas de abastecimiento. Aunque los estudios estadísticos revelan que pueden ser menos visibles que el brócoli, ambas crucíferas pertenecen al mismo grupo productivo y presentan problemas similares de generación de residuos, como las hojas externas, los tallos y las partes dañadas. Según el ESPAC, el rubro del brócoli, coliflor y col está registrado en una misma categoría, y para el año 2024, dicho rubro alcanzó aproximadamente 10.019,83 ha de superficie plantada, 9.963,19 ha cosechadas y una producción de 124.779,22 toneladas, lo que equivale a un rendimiento aproximado de 12,52 t/ha. En años anteriores, el rendimiento fue variable, destacándose 20,02 t/ha en 2023 y 18,37 t/ha en 2021 (MAG, 2024).

### ***c. Cantidad promedio de residuos generados***

Mago et al. (2022), indican que los residuos de coliflor y col pueden representar entre 30 y 50 % de los residuos generados en la producción. Mientras que, en el brócoli, de acuerdo con Eugui et al. (2023), alrededor del 60 % suele quedar descartado durante la cosecha y el acondicionamiento, especialmente las hojas y los tallos. Estos porcentajes no deben aplicarse de forma exacta a todos los sistemas de producción, ya que varían según el tipo de cosecha, las exigencias del mercado y el tamaño de la hortaliza.

#### **1.1.2.3 Valorización de residuos vegetales y obtención de harinas**

##### ***a. Residuos agroalimentarios***

Los residuos agroalimentarios son desechos orgánicos generados durante la producción, cosecha, transporte, procesamiento, distribución y consumo de la materia prima. Aunque, por lo general, se consideran desechos, muchos de estos residuos conservan nutrientes y compuestos funcionales. En vegetales frescos, los residuos suelen tener una alta humedad, lo que acelera el deterioro microbiológico y enzimático. Por ello, una estrategia común para su aprovechamiento consiste en reducir la humedad mediante el secado, seguido de molienda y tamizado para obtener pulverizados. Dichos materiales pueden ser más fáciles de almacenar y transportar, pero su estabilidad depende de su capacidad de adsorber vapor de agua del ambiente (Ueda et al., 2023).

##### ***b. Obtención de harinas vegetales***

La obtención de harinas o pulverizados vegetales a partir de residuos comprende varias etapas: selección y limpieza de la materia prima, reducción de tamaño, aplicación o no de tratamientos previos, secado, molienda, tamizado y almacenamiento; cada una de estas etapas influye en el producto final.

Según Essilfie et al. (2026), la reducción del tamaño de partícula mejora la transferencia de calor y de masa durante el secado, pero también puede aumentar la exposición al oxígeno y favorecer la pérdida de compuestos sensibles. El secado disminuye la actividad de agua ( $a_w$ ) y, por tanto, aumenta la tendencia a adsorber y desorber vapor de agua. Por ello, la caracterización de las harinas debe incluir no solo la humedad y la composición proximal, sino también las propiedades de sorción.

### ***c. Importancia tecnológica de las harinas de residuos***

Las harinas a partir de residuos vegetales pueden aportar un sinnúmero de compuestos bioactivos y moléculas que incrementen su valor nutricional. Sin embargo, estudios realizados por Ocampo et al. (2025), indican que este tipo de matrices puede presentar problemas tecnológicos, como higroscopicidad, apelmazamiento, cambios de color, pérdida de fluidez y deterioro de los compuestos sensibles si se almacenan en ambientes húmedos. Las isotermas de adsorción permiten anticipar estos cambios porque demuestran la relación entre la actividad de agua ( $a_w$ ) y la humedad de equilibrio; a su vez, el calor isostérico permite interpretar la fuerza con la que el agua se une a los sitios activos de la matriz. Esta es de suma utilidad para poder diseñar procesos de secado eficientes y definir envases adecuados para harinas obtenidas a partir de los residuos de estas tres crucíferas (Acurio et al., 2024).

#### **1.1.2.4 Proceso de secado de residuos vegetales**

##### ***a. Concepto de Secado***

Según Li et al. (2025), durante el secado, el agua migra desde el interior del material hacia la superficie y luego se evapora en el medio circundante. La velocidad de este proceso dependerá de variables como la temperatura, la humedad relativa del aire, la velocidad del aire, el espesor de la muestra, la estructura del tejido, la composición química y la cantidad de agua del alimento. En residuos de crucíferas, la alta humedad inicial y la presencia del tejido fibroso, hacen que el secado sea necesario para evitar el deterioro. No obstante, los ensayos realizados por Bas-Bellver et al. (2022), indican que, al convertir el residuo en harina, la matriz resultante conserva componentes hidrofílicos capaces de reabsorber humedad, por lo que la estabilidad posterior también dependerá del comportamiento de adsorción.

##### ***b. Tipos de secado aplicables a vegetales***

Entre los métodos aplicables a los vegetales se encuentran el secado por aire caliente, el secado solar controlado, la liofilización, el secado al vacío, el secado por microondas, el secado por infrarrojo y los métodos combinados. La liofilización suele conservar mejor los aspectos visuales, como el color, la estructura y los compuestos sensibles, pero su desventaja es que requiere un mayor consumo de energía. Por esta razón, el secado por aire caliente es más accesible y ampliamente utilizado en alimentos, aunque es mucho más susceptible a pérdidas debido a la exposición a la temperatura y al oxígeno.

Las tecnologías emergentes y combinadas buscan mejorar la velocidad de secado y disminuir las curvas de secado, reduciendo así el consumo energético y preservando la calidad de la matriz alimentaria (Guo et al., 2024).

### ***c. Secado convectivo por aire caliente***

El secado convectivo con aire caliente es uno de los métodos más utilizados para residuos vegetales debido a la facilidad de escalarlo a la industria. Como señalan Asrate & Ali (2025), este método consiste en hacer circular aire caliente sobre el alimento para aportar calor y eliminar todo el vapor de agua. En el caso de los residuos de brócoli, coliflor y col, este método puede permitir la obtención de pulverizados o harinas más estables si se controlan la temperatura, el tiempo y el tamaño de partícula de la materia vegetal. Zhao et al. (2025), reportan la obtención de polvos de brócoli y col blanca mediante secado por aire caliente, enfatizando que estos procesos pueden transformar descartes perecederos en un suplemento funcional más estable.

### ***d. Variables que afectan el secado***

Las variables más importantes del secado, como se mencionó anteriormente, son la temperatura, el tiempo, el tamaño de partícula, la velocidad del aire y la humedad relativa del aire durante el secado. Temperaturas altas aceleran la remoción del agua en el alimento, pero pueden degradar clorofilas, vitamina C, compuestos fenólicos o glucosinatos (Villaño et al., 2023). El tamaño de las partículas influye en la distancia de difusión del agua; partículas más pequeñas, al presentar una menor distancia de difusión, se secarán mucho más rápido, aunque podrían presentar una mayor oxidación superficial. Bas-Bellver et al. (2022), sostienen que la velocidad del aire favorece la remoción del vapor en la superficie, mientras que la humedad del aire determina la fuerza impulsora del secado. La comprensión de estas variables se complementa con el estudio de isotermas, ya que el contenido de humedad final debe relacionarse con la actividad de agua ( $a_w$ ) y no solo con el porcentaje de humedad.

## **1.1.2.5 Efectos de los tratamientos previos al secado**

### ***a. Escaldado***

El escaldado es un tratamiento térmico de corta duración con agua caliente o vapor, aplicado antes del secado, de la congelación o del envasado. Su finalidad es inactivar enzimas como las peroxidasas y la oxidasa, reducir la carga microbiana superficial, fijar el color y suavizar el tejido. En las crucíferas, el escaldado puede reducir los olores fuertes o los sabores desagradables y facilitar el secado, debido a cambios en las membranas celulares. Sin embargo, también puede reducir las vitaminas solubles en agua y los compuestos fenólicos si el tratamiento se prolonga demasiado. Por lo tanto, debe optimizarse para evitar una pérdida significativa de valor funcional (Saini et al., 2023a).

### ***b. Vapor***

El uso del vapor como pretratamiento, conocido como escaldado con vapor, consiste en exponer la matriz vegetal al vapor de agua antes del secado. Este tratamiento busca inactivar las enzimas responsables del oscurecimiento, reducir la carga microbiana, modificar la estructura del tejido vegetal y mejorar la transferencia de humedad durante el secado. Sun et al. (2023), mencionan que es preferible a la inmersión en agua caliente porque reduce la pérdida de compuestos solubles.

En los residuos de crucíferas como brócoli y coliflor, el vapor es crucial debido a su alta humedad y a sus compuestos sensibles. Los estudios muestran que el escaldado con vapor reduce el tiempo de secado y mejora la movilidad del agua, aunque el efecto depende de la temperatura y del tiempo de escaldado (Essilfie et al., 2026). También influye en las propiedades de las harinas obtenidas al modificar la estructura celular y la interacción con el agua, por lo que es importante evaluar la humedad final y otros parámetros tras el tratamiento.

### ***c. Ultrasonido, microondas u otros tratamientos emergentes***

Li et al. (2024), plantean que el ultrasonido puede generar cavitación y microcanales en el tejido vegetal, lo que favorece la liberación de agua durante el secado. Un horno de microondas se calienta a escala volumétrica y puede acelerar la evaporación interna, aunque requiere control para evitar sobrecalentamientos localizados.

Otros nuevos tratamientos, como el infrarrojo o el campo eléctrico, buscan mejorar la eficiencia energética y preservar la calidad. Siguiendo la investigación de Santos et al. (2025), sobre el procesamiento sostenible de alimentos, destaca estas tecnologías como alternativas a la intensificación de los procesos de secado y extracción, especialmente al trabajar con residuos vegetales ricos en compuestos funcionales.

### ***d. Efectos sobre color, textura, nutrientes y transferencia de humedad***

El pretratamiento puede alterar el color, la textura, la porosidad y la composición. Una superficie más porosa puede secarse más rápido, pero también puede generar una harina más higroscópica debido al aumento de la superficie (Ciurzyńska et al., 2025).

La pérdida de estructura celular puede liberar solutos y alterar la forma en que el agua se incorpora. Por tanto, la calidad final de la harina depende no sólo de la conservación de los nutrientes, sino también del control de su interacción con el vapor de agua durante el almacenamiento. Esta relación explica la importancia de integrar estudios de secado, de actividad del agua, de isoterma y de calor isostérico en un único sistema experimental.

### **1.1.2.6 Cinética de secado**

#### ***a. Definición de cinética de secado***

La cinética de secado estudia la variación del contenido de humedad de un material en función del tiempo bajo condiciones controladas. Su análisis permite estimar la velocidad de pérdida de agua, identificar etapas del proceso y seleccionar modelos matemáticos que ayuden a describir el comportamiento del producto (Ambawat et al., 2022). Este estudio por lo general se expresa mediante curvas de humedad, velocidad de secado o relación de humedad, tal como lo describe Chigbo et al. (2024), en una etapa inicial puede producirse una pérdida rápida de agua superficial; posteriormente, la velocidad disminuye porque el agua debe difundirse desde el interior de la matriz hacia la superficie. En los alimentos vegetales, es muy frecuente que predomine el periodo de velocidad decreciente, lo que indica que la difusión interna controla el proceso. Esta información ayuda a comparar diferentes especies dentro de un mismo grupo, así como a determinar el mejor tratamiento previo, las temperaturas y el tamaño de las partículas.

#### ***b. Curvas de secado y relación de humedad***

Las curvas de secado representan el contenido de humedad en función del tiempo y permiten visualizar con qué rapidez se alcanza la humedad de equilibrio ( $x_e$ ). La relación de humedad, por su parte, normaliza la humedad del producto respecto de la humedad inicial y de la de equilibrio, lo que facilita el ajuste de los modelos matemáticos. En residuos de vegetales, este análisis permite estimar parámetros que luego van a relacionarse con propiedades termodinámicas, una muestra de que el proceso de secado es mucho más rápido no necesariamente será obtener una menor higroscopicidad, por ello es necesario complementar este estudio con isotermas de adsorción (Mansour et al., 2025).

#### ***c. Modelos matemáticos de cinética de secado***

Los modelos de Newton, Page, Henderson y Pabis, y Midilli-Kucuk se usan comúnmente para describir la pérdida de humedad en alimentos. La selección del modelo dependerá en gran medida del ajuste y del enfoque estadístico que se le dé, así como de su interpretación física. Ayoola et al. (2026), explican que muchos modelos son empíricos o semiempíricos y permiten comparar condiciones de proceso y estimar los tiempos de secado. En los residuos de crucíferas, estos modelos ayudan a identificar la temperatura y el tratamiento más adecuados para obtener harinas estables que conserven sus compuestos bioactivos. Conocer la cinética permite establecer tiempos de secado adecuados y evitar tanto el subsecado, que compromete la estabilidad, como el sobresecado, que aumenta los costos energéticos y puede deteriorar la calidad.

### **1.1.2.7 Actividad de agua y humedad de equilibrio**

#### ***a. Agua libre y humedad ligada***

El agua en los alimentos puede encontrarse como agua libre, agua adsorbida, agua capilar o agua ligada a los componentes de la matriz; por ende, no toda el agua tiene la misma participación en el deterioro. La actividad ( $a_w$ ) mide la disponibilidad del agua para reacciones químicas y enzimáticas, así como para el crecimiento microbiano, y está relacionada con la presión de vapor del agua en el alimento respecto a la del agua pura a la misma temperatura. Según Fikry et al. (2025), dos harinas con la misma humedad pueden presentar distinta estabilidad si el agua está ligada con distinta intensidad.

El agua libre se encuentra menos unida a la matriz y puede participar con mayor facilidad en reacciones asociadas al deterioro o al crecimiento microbiano. Tal como lo señalan Mutlu et al. (2024), en su investigación, el agua ligada se asocia a grupos polares de proteínas, carbohidratos, fibra y sales; por esta razón, se requiere más energía para ser removida. En harinas de residuos de crucíferas, la fibra y los compuestos hidrofílicos proporcionan sitios de unión para el agua, una matriz alimentaria que presente una menor humedad que los sitios más activos se ocupa primero y el agua se une con mayor fuerza; conforme aumenta la humedad proceden a formar capas adicionales menos energéticas (Bongjo et al., 2025).

#### ***b. Actividad de agua ( $a_w$ )***

La actividad de agua ( $a_w$ ) es un parámetro de suma importancia para la conservación de alimentos deshidratados y pulverizados. Jia et al. (2022), mencionan que valores bajos de  $a_w$  reducen la posibilidad de crecimiento microbiano y limitan reacciones de oxidación. Aunque en comparación con el trabajo de Dimassi (2026), donde este autor señala que algunas reacciones de oxidación pueden ocurrir en rangos intermedios. En los pulverizados vegetales, la  $a_w$  también se relaciona con la fluidez, el apelmazamiento, los cambios de color y la estabilidad de los compuestos bioactivos.

#### ***c. Humedad de equilibrio ( $x_e$ )***

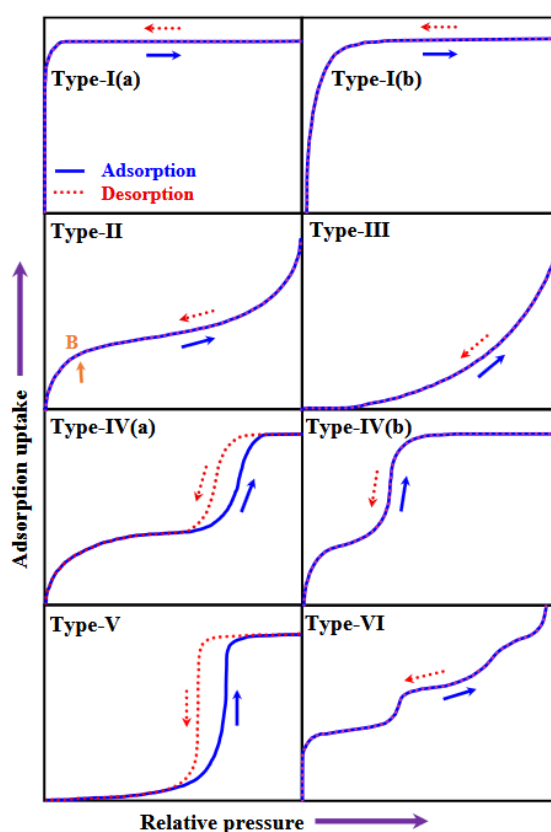
La humedad de equilibrio es el contenido de agua que alcanza un alimento cuando se expone a una humedad relativa constante a una temperatura determinada durante un lapso definido. Si la humedad del ambiente es alta, una harina higroscópica adsorbe vapor de agua hasta alcanzar el equilibrio; para ello, dependerá de la temperatura, la composición, el tamaño de partícula, la porosidad y los tratamientos previos. Por esta razón este parámetro debe determinarse experimentalmente para cada harina y condición de temperatura (do Carmo et al., 2025).

### 1.1.2.8 Isotermas

#### a. Tipos de isotermas

En los alimentos, las isotermas pueden clasificarse según su forma (*Figura 1*). Las denominadas Tipo II son sigmoideas y comunes en alimentos ricos en biopolímeros, como proteínas, almidones y fibras. Las de Tipo III son más frecuentes en productos con alto contenido de azúcares solubles o con componentes higroscópicos. Por otro lado, en harinas de residuos de crucíferas se podría esperar un comportamiento muy cercano al Tipo III, debido a la presencia de fibra, proteínas y carbohidratos estructurales; sin embargo, la forma final debe confirmarse de manera experimental, ya que su composición y los tratamientos previos que se apliquen pueden llegar a cambiarlos (Iji et al., 2025).

**Figura 1.** Tipos de isotermas de adsorción.



**Fuente:** Noguera & Rivero (2021)

#### b. Isotermas en harinas y polvos vegetales

En los pulverizados vegetales, las isotermas resultan particularmente relevantes, ya que estos productos presentan una alta superficie de contacto con componentes hidrofílicos. La molienda, tal como la describen Acurio et al. (2024), puede aumentar la exposición de sitios activos, lo que intensifica la adsorción de agua. Además, los cambios estructurales durante el secado alteran la porosidad y la disponibilidad de los grupos funcionales.

Es por esta razón que las isotermas permiten establecer límites de humedad relativa durante el almacenamiento y definir el tipo de empaque requerido; por ejemplo, para una harina cuya humedad relativa aumenta rápidamente a una  $a_w$  intermedia, se requerirán materiales con baja permeabilidad al vapor de agua (Gichau et al., 2019).

### ***c. Aplicación en harinas de brócoli, coliflor y col***

La aplicación de isotermas de adsorción a estas tres crucíferas permite comparar la afinidad que las harinas elaboradas a partir de los residuos tendrán por el agua. Khaled et al. (2025), aseguran que dicha afinidad puede variar según la composición: el brócoli puede aportar una proporción de tallos y hojas ricos en fibra, la coliflor puede contener hojas y recortes con estructuras distintas, y la col puede presentar capas foliares y diversos compuestos solubles. Las isotermas permitirán identificar si una harina adsorbe más agua a una  $a_w$  determinada y requerirá condiciones de almacenamiento más estrictas. Sumado a esto, los datos a diferentes temperaturas permiten calcular el calor isostérico de adsorción mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron.

#### **1.1.2.9 Calor isostérico de adsorción**

##### ***a. Calor isostérico neto y total***

El calor isostérico es una propiedad termodinámica que representa la energía asociada a la adsorción de agua en un alimento a un contenido de humedad constante. Siqueira-de-Lima et al. (2024), sostienen que depende de la intensidad de las interacciones entre las moléculas de agua y los sitios activos de la matriz sólida. En términos exactos, permite estimar la energía necesaria para extraer el agua durante el secado y comprender la tendencia de dicho polvo a retener humedad en la etapa de almacenamiento.

El calor isostérico neto corresponde a la energía adicional de unión del agua al alimento, en comparación con el calor de vaporización del agua pura. Por otro lado, el calor isostérico total se obtiene sumando el calor neto y el calor latente de vaporización del agua. Esta distinción es importante porque permite separar la energía propia del cambio de fase de la energía específica asociada a las interacciones entre el agua y la matriz (Al-Khalili et al., 2023).

##### ***b. Ecuación de Clausius-Clapeyron***

Fogang Mba et al. (2025), afirman que el calor isostérico de adsorción se calcula a partir de las isotermas de adsorción a diferentes temperaturas. La ecuación de Clausius-Clapeyron relaciona el logaritmo natural de la actividad de agua ( $a_w$ ) con el inverso de la temperatura absoluta a presión constante. La pendiente de esta relación permite estimar el calor isostérico neto. Para aplicar correctamente esta ecuación, se requieren isotermas determinadas experimentalmente mediante gravimetría.

### ***c. Relación entre humedad y calor isostérico***

La relación entre la humedad y el calor isostérico suele ser inversa. Al-Khalili et al. (2023), mencionan que, a contenidos bajos de humedad, el agua se adsorbe en sitios activos de alta energía, como grupos hidroxilo, carboxilo, amino o regiones polares de la fibra y de la proteína. Conforme aumenta la humedad, esos sitios se saturan y el agua adicional se une a moléculas previamente adsorbidas, formando multicapas o llenando capilares, con una menor energía de interacción. Por lo tanto, el calor isostérico disminuye al aumentar la humedad y tiende a acercarse al calor de vaporización del agua a contenidos elevados.

### ***d. Importancia del calor isostérico en harinas vegetales***

En las harinas elaboradas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col, el calor isostérico permite comparar la fuerza de unión del agua en cada matriz. Si la harina tiene un calor isostérico mayor en condiciones de baja humedad, tal como lo describe Siqueira-de-Lima et al. (2024), sus sitios activos presentan una mayor afinidad por el agua, posiblemente debido a un mayor contenido de fibras, proteínas o compuestos hidrofílicos. Esta información ayuda a planificar procesos de secado al indicar la cantidad de energía necesaria para alcanzar un nivel de humedad determinado. En el artículo de Fogang Mba et al. (2025), indican que estos parámetros permiten elegir las condiciones de envasado y almacenamiento, ya que las harinas con alta afinidad por el agua pueden absorber humedad fácilmente cuando se exponen a un ambiente húmedo.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

- Determinar el calor isostérico de adsorción de agua en harinas obtenidas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col sometidos a diferentes pretratamientos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar harinas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col sometidos a diferentes pretratamientos.
- Construir las isothermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas a diferentes temperaturas, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos.
- Calcular el calor isostérico neto de adsorción de agua a partir de las isothermas experimentales, analizando la influencia de la temperatura y de la humedad de equilibrio sobre la estabilidad del producto.

## CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

### 2.1 Materiales

Para este trabajo de titulación se utilizaron los equipos y recursos disponibles en la Unidad Operativa de Investigación y Desarrollo (UODIDE), ubicada en la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato (Tabla 1).

**Tabla 1.** *Materiales y equipos necesarios para la realización del proyecto de investigación.*

| Reactivos                              | Cantidad   |
|----------------------------------------|------------|
| Agua destilada                         | 1000 mL    |
| Alcohol al 96 %                        | 1000 mL    |
| Cloruro de litio                       | 50 g       |
| Cloruro de potasio                     | 50 g       |
| Cloruro de magnesio                    | 50 g       |
| Yoduro de potasio                      | 50 g       |
| Sulfato de amonio                      | 50 g       |
| Equipos                                | Tiempo [h] |
| Cámara de secado                       | 96         |
| Cocina industrial                      | 3          |
| Microondas                             | 1          |
| Vaporera                               | 1          |
| Estufa eléctrica                       | 1          |
| Molino                                 | 3          |
| Incubadora                             | 2190       |
| Balanza analítica                      | 6          |
| Balanza de precisión para alimentos    | 2          |
| Balanza de humedad                     | 6          |
| Medidor de actividad de agua (AquaLab) | 3          |
| Material de Laboratorio                | Unidades   |
| Frascos herméticos                     | 12         |
| Vasos de precipitación                 | 1          |
| Bandejas                               | 5          |
| Espátula                               | 1          |
| Varilla de agitación                   | 1          |
| Matraz                                 | 4          |
| Cuchillo                               | 1          |
| Papel absorbente                       | 1          |

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Elaboración de harinas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col sometidos a diferentes pretratamientos

#### 2.2.1.1 Materia prima

El brócoli, la coliflor y la col fueron adquiridos en supermercados de la ciudad de Ambato. En las muestras se incluyeron tallos, hojas externas y partes no comerciales, procurando que se encontraran en buen estado, libres de daños fúngicos y mecánicos. En el laboratorio se realizaron la selección y clasificación de los residuos, seguidas del lavado con agua potable y del enjuague con agua destilada. Posteriormente, se procedió al corte en láminas de  $2 \pm 0,1$  mm de espesor para el brócoli y la coliflor, y en láminas de  $5 \pm 0,5$  cm de largo y  $2 \pm 0,25$  cm de ancho para la col.

#### 2.2.1.2 Tratamientos previos

Los residuos fueron sometidos a pretratamientos térmicos, como la cocción en agua, en vapor y en microondas, antes del proceso de secado. La finalidad principal de estos tratamientos fue inactivar la peroxidasa y la mirosinasa, ya que podrían provocar pardeamiento indeseado y una degradación acelerada de los glucosinolatos, lo que afectaría el color, el valor nutricional y la calidad organoléptica del producto final (*Figuras 2–4*). Además de la estabilización enzimática, los pretratamientos permiten ablandar la matriz del tejido vegetal y facilitar la liberación de agua. De esta manera, se favorece la cinética de secado y se reduce el tiempo requerido para la deshidratación posterior.

**Figura 2.** Muestras de brócoli antes y después de los diferentes pretratamientos.

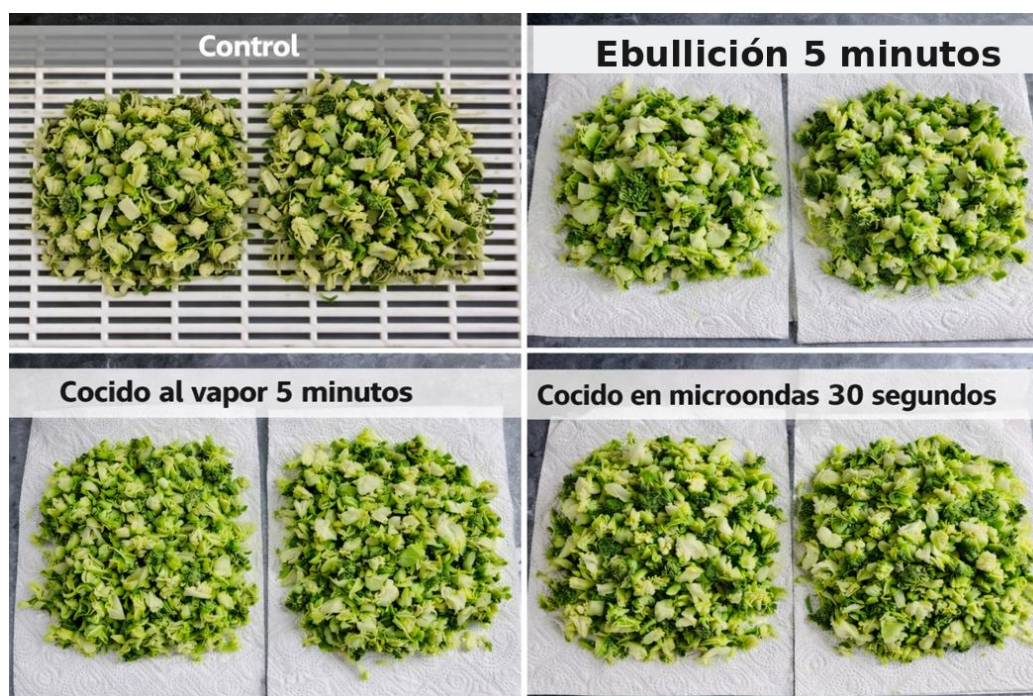


**Figura 3.** Muestras de coliflor antes y después de los diferentes pretratamientos.

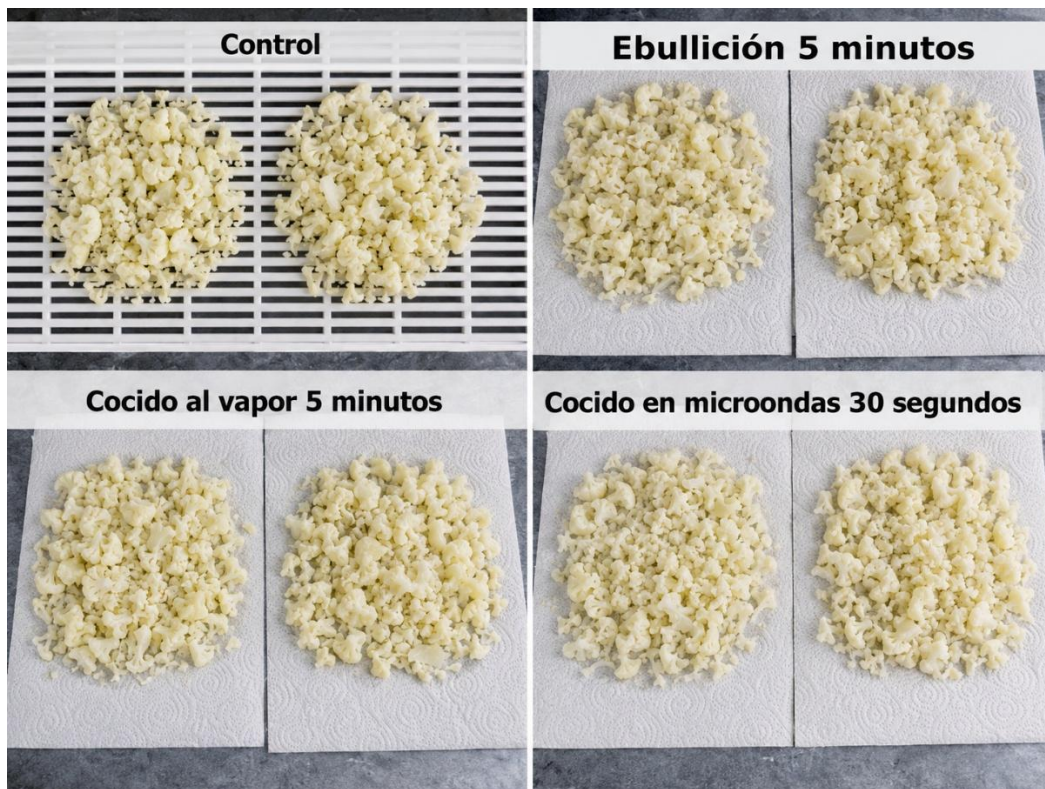
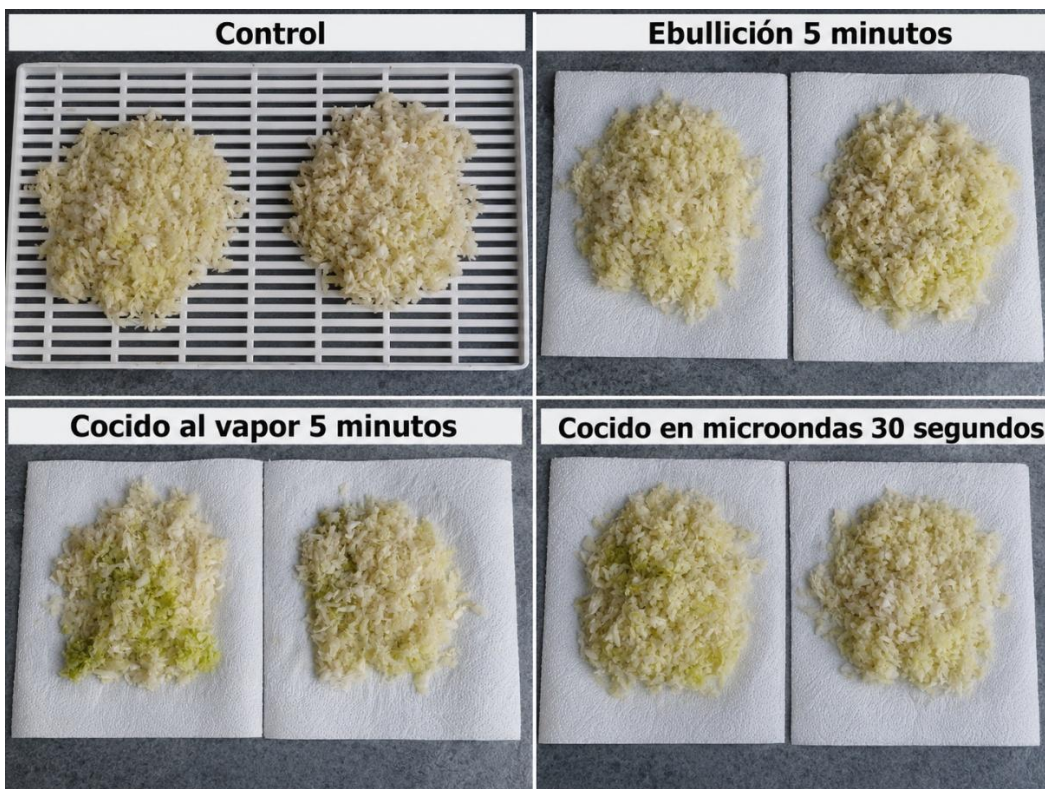


**Figura 4.** Muestras de col antes y después de los diferentes pretratamientos.



### **2.2.1.3 Muestra control**

Se separaron alrededor de 500 gramos de láminas de cada una de las crucíferas y se sometieron directamente al proceso de secado en un deshidratador. Esta muestra se utilizó como control para compararla con las muestras sometidas a los diferentes pretratamientos.

### **2.2.1.4 Residuos de crucíferas cocidos en agua**

Las láminas se sumergieron en agua a ebullición durante 5 minutos. Una vez transcurrido el tiempo de cocción, las muestras fueron retiradas del agua caliente y enfriadas de inmediato en agua helada. Finalmente, se realizó el secado superficial con papel toalla (López-Hernández et al., 2022).

### **2.2.1.5 Residuos de crucíferas cocidos en vapor**

Para el pretratamiento con vapor se aplicó un método de escaldado más leve. Las muestras fueron sometidas a cocción al vapor durante 5 minutos. Inmediatamente después del tratamiento, los residuos fueron enfriados mediante inmersión en agua helada para detener la acción térmica y la de las enzimas. Posteriormente, se secaron superficialmente con papel toalla (Nowak et al., 2025).

### **2.2.1.6 Residuos de crucíferas cocidos en microondas**

El tratamiento asistido por microondas se realizó en un horno comercial durante 30 segundos, a una potencia de 750 W. Al finalizar la exposición, las muestras fueron sometidas a enfriamiento inmediato en agua helada y luego se secaron superficialmente, con el propósito de detener el proceso térmico y evitar la degradación de los compuestos presentes en los residuos (Nowak et al., 2025).

### **2.2.1.7 Secado y elaboración de harina**

El secado se realizó en una cámara de secado convectivo ROSPEC (modelo FD-1200E), que operó a una velocidad del aire de 2 m/s y a una temperatura constante de 65 °C durante 8 horas. Este procedimiento se aplicó siguiendo la metodología de Acurio et al. (2024), que demostró ser eficiente en matrices vegetales ricas en almidón y fibra.

Después del secado, los residuos completamente deshidratados fueron molidos con un molino eléctrico (Hamilton Beach-80335g) en cuatro intervalos de 10 segundos cada uno, hasta obtener un polvo homogéneo. Finalmente, las muestras fueron almacenadas en fundas aluminizadas con cierre hermético, protegidas de la humedad ambiental y de la exposición a la luz, ya que estas condiciones podían alterar los puntos de equilibrio higroscópico.

## **2.2.2 Construcción de las isotermas de adsorción de agua de las harinas obtenidas a diferentes temperaturas, utilizando soluciones salinas saturadas como factores higroscópicos**

### **2.2.2.1 Preparación y acondicionamiento de materiales e insumos experimentales**

Previo a la determinación del contenido de humedad en equilibrio, se realizaron la limpieza y la esterilización de las cápsulas de vidrio utilizadas para colocar las muestras de harina. Este procedimiento permitió reducir posibles interferencias debidas a la contaminación por levaduras y mohos. Adicionalmente, las sales empleadas en la preparación de las soluciones salinas saturadas fueron sometidas a un proceso de pasteurización para asegurar mejores condiciones de higiene y estabilidad durante el ensayo de adsorción. De esta manera, se garantizó que los materiales e insumos utilizados estuvieran en condiciones adecuadas para el desarrollo experimental.

#### ***a. Esterilización de las cápsulas de vidrio***

Para el desarrollo de esta fase experimental se utilizaron cápsulas de vidrio, a las cuales se les realizó un enjuague previo con agua, seguido de una limpieza profunda con agua y jabón líquido. Posteriormente, se esterilizaron estas cápsulas con agua en ebullición durante 15 min, se dejaron secar, se realizó una última limpieza con alcohol al 96 % y, finalmente, se procedió a rotular cada una de ellas con su codificación correspondiente.

#### ***b. Preparación y pasteurización de las sales saturadas***

Para la preparación de las soluciones de sales saturadas se utilizaron frascos herméticos previamente esterilizados, en los cuales se colocaron 50 gramos de cada una de las sales y luego se hidrataron poco a poco con agua destilada hasta que ya no se disolviera la sal. A continuación, se realizó una pasteurización lenta a 65 °C durante 30 min. Finalmente, se dejaron enfriar los frascos herméticos.

### **2.2.2.2 Determinación del contenido de humedad en equilibrio ( $x_e$ )**

Se utilizó la metodología descrita por Acurio et al. (2024), para determinar el contenido de humedad de equilibrio, mediante el método gravimétrico estático, empleando soluciones salinas saturadas que permitieron generar condiciones constantes de actividad de agua en ambientes herméticos. Se utilizaron las sales indicadas en la *Tabla 2*, debido a que estas generaron condiciones de humedad relativa en un rango aproximado de 11 a 80 %.

En las cápsulas de vidrio se colocó aproximadamente 1 g de harina y, posteriormente, las muestras fueron introducidas en los envases herméticos, utilizando torres de plástico para asegurar las cápsulas; por último, estos envases se ubicaron en incubadoras a 20, 30 y 40 °C. Esto permitió evaluar el comportamiento de adsorción en función de la temperatura.

Las muestras fueron pesadas periódicamente hasta que no se detectaron variaciones significativas de masa, con una precisión de 0,0001 g. Este comportamiento indicó que se había alcanzado el equilibrio higroscópico. La humedad de equilibrio, expresada como  $x_e$ , se calculó en base seca y se utilizó como parámetro para la representación gráfica de las isothermas de adsorción (Ecuación 1).

$$x_{e(b.s)} = \frac{P_0 \times x_0 + \Delta P}{P_0 \times (1 - x_0)} \quad [\text{Ec. 1}]$$

**Tabla 2 . Soluciones salinas saturadas para determinar las isothermas de adsorción.**

| Nombre              |          | Nomenclatura                                    | $a_w$  | Temperatura (°C) |
|---------------------|----------|-------------------------------------------------|--------|------------------|
| Cloruro de potasio  | Sal      | KCl                                             | 0,4960 | 25,03            |
|                     | Solución |                                                 | 0,8461 | 24,82            |
| Sulfato de amonio   | Sal      | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 0,4197 | 24,98            |
|                     | Solución |                                                 | 0,8140 | 24,65            |
| Yoduro de potasio   | Sal      | KI                                              | 0,4545 | 25,10            |
|                     | Solución |                                                 | 0,6964 | 24,91            |
| Cloruro de magnesio | Sal      | MgCl <sub>2</sub>                               | 0,0399 | 24,89            |
|                     | Solución |                                                 | 0,3754 | 24,77            |
| Cloruro de Litio    | Sal      | LiCl                                            | 0,0302 | 24,89            |
|                     | Solución |                                                 | 0,1188 | 24,66            |

### 2.2.3 Cálculo del calor isostérico neto de adsorción de agua a partir de las isothermas experimentales

El cálculo del calor isostérico de adsorción se realizó mediante la ecuación de Clausius–Clapeyron, que relaciona la actividad del agua con la temperatura a un nivel de humedad de equilibrio fijo (Tabla 3). Para ello, se graficó el valor de  $\ln(a_w)$  en función del inverso de la temperatura, expresado como  $1/T$  (K<sup>-1</sup>), para cada valor de  $x_e$  determinado a partir de las isothermas experimentales.

Las pendientes obtenidas mediante regresión lineal negativa permitieron calcular el calor isostérico de adsorción, representado como  $q_{st}$ . Este parámetro reflejó la energía necesaria para unir las moléculas de agua a la matriz del alimento y permitió analizar la influencia de la temperatura y de la humedad de equilibrio sobre la estabilidad de las harinas obtenidas.

**Tabla 3.** Fórmulas utilizadas para el cálculo del calor isostérico de adsorción.

| Concepto                                        | Ecuación                                                                    | Nº      |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------|
| Ecuación general de Clausius–Clapeyron          | $q_{st} = -R \left( \frac{\partial \ln(a_w)}{\partial \frac{1}{T}} \right)$ | [Ec. 2] |
| Relación lineal usada para obtener la pendiente | $\ln(a_w) = -\frac{q_{st}}{R} \left( \frac{1}{T} \right) + C$               | [Ec. 3] |
| Cálculo de la pendiente (m)                     | $m = -\frac{q_{st}}{R}$                                                     | [Ec. 4] |
| Cálculo directo del calor isostérico            | $q_{st} = -m \times R$                                                      | [Ec. 5] |
| Actividad de agua (base logarítmica natural)    | $\ln(a_w) = \log_e(a_w)$                                                    | [Ec. 6] |

**Fuente:** Fikry et al. (2025)

### CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis y discusión de los resultados

##### 3.1.1 Actividad de agua ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%H) previos y posterior al secado

Los valores de actividad de agua y de humedad posteriores al pretratamiento se presentan en la *Tabla 4*. Nótese que en todos los casos se trata de matrices vegetales con elevada disponibilidad de agua, lo cual es coherente con la naturaleza fisiológica de los tejidos frescos de las crucíferas. Las muestras correspondientes al control presentaron actividades de agua de 0,9725 para el brócoli, 0,9623 para la coliflor y 0,951 para la col. Dichos valores ubican a estas crucíferas en una zona de alto riesgo microbiológico, debido a que una fracción importante de agua se encuentra en lo que, según Cui et al. (2023), se denomina un estado móvil. Este estado genera una alta disponibilidad de las reacciones químicas y enzimáticas, de la respiración residual y del crecimiento microbiano. Además, la elevada humedad inicial de la col sugiere una estructura tisular con mayor cantidad de agua retenida en espacios intracelulares y vacuolares, mientras que la del brócoli mostró menos humedad inicial relativa, probablemente por la mayor proporción de los tejidos fibrosos y estructuras lignocelulósicas en tallos (Roos, 2024).

**Tabla 4.** Actividad de agua ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%H) de las crucíferas antes del secado.

| Tratamiento | Muestra  | $a_w$ inicial | %H inicial |
|-------------|----------|---------------|------------|
| Control     | Brócoli  | 0,9725        | 87,0759    |
|             | Coliflor | 0,9623        | 93,3237    |
|             | Col      | 0,9561        | 96,8078    |
| Ebullición  | Brócoli  | 0,9823        | 89,3099    |
|             | Coliflor | 0,9544        | 97,9593    |
|             | Col      | 0,9780        | 92,7843    |
| Vapor       | Brócoli  | 0,9819        | 90,1452    |
|             | Coliflor | 0,9733        | 94,7659    |
|             | Col      | 0,9866        | 92,6647    |
| Microondas  | Brócoli  | 0,9812        | 89,5032    |
|             | Coliflor | 0,9333        | 94,2583    |
|             | Col      | 0,9830        | 90,5072    |

A partir de los valores obtenidos, se observa que los pretratamientos térmicos modificaron de manera diferencial el estado inicial del agua. Por ejemplo, la ebullición provocó un incremento en la actividad de agua del brócoli hasta 0,9823 y de la col hasta 0,9780, mientras que la coliflor mostró un valor de 0,9544. El vapor por otro lado generó valores de 0,9819; 0,9733 y 0,9866 para brócoli, coliflor y col, respectivamente; dicho comportamiento puede deberse según datos experimentales de Sun et al. (2023), a una redistribución del agua en el interior de la matriz celular inducida por el propio calentamiento. Durante la exposición térmica, la membrana plasmática y las paredes celulares pierden cierta selectividad, se rompen algunos gradientes osmóticos y esto facilita la migración de agua desde zonas intracelulares hacia zonas capilares y superficiales (Aviara, 2020). En consecuencia, aunque el contenido total de humedad pueda variar poco antes del secado, la fracción de agua libre aumenta en determinadas muestras. Esta diferencia entre la cantidad total de agua y actividad de agua es crítica; la humedad describe masa retenida, mientras que el valor de  $a_w$  describe el potencial químico del agua y, por tanto, su capacidad de participar en los procesos de deterioro.

En la *Tabla 5* se observa una reducción sustancial de  $a_w$  y %H en todas las matrices tras el secado. Las muestras de control alcanzaron valores finales de  $a_w$  de 0,4491 en el brócoli, 0,5057 en la coliflor y 0,4742 en la col. Aunque estos valores representan una reducción significativa respecto de los de las crucíferas frescas, el valor de  $a_w$  de la coliflor es superior al de las demás muestras. Arslan-Tontul (2020), indica que esto se puede deber a una mayor persistencia de agua disponible respecto al brócoli y la col.

En los tratamientos térmicos, la ebullición redujo el  $a_w$  final a 0,4468 en brócoli, 0,4222 en coliflor y 0,4266 en col; el vapor generó valores de 0,3952, 0,4448 y 0,3323; y el microondas produjo valores de 0,4971, 0,5259 y 0,2937. La col que fue sometida a microondas por un periodo de 30 segundos presentó la menor  $a_w$  final, lo que sugiere una matriz final mucho más estable con respecto al deterioro, siempre y cuando el almacenamiento de la harina impida una rehidratación y un sellado hermético adecuado.

La reducción de  $a_w$ , que en general se encuentra por debajo del 0,60, se correlaciona con los datos presentados por Sahu et al. (2021), los cuales mencionan que esta  $a_w$  se asocia fuertemente con el crecimiento de la mayoría de las bacterias, levaduras y mohos, en especial, aunque no eliminan reacciones enzimáticas ni químicas ni pérdida de compuestos bioactivos. En harinas vegetales, el objetivo tecnológico no consiste únicamente en reducir la humedad, sino en alcanzar un estado de baja movilidad molecular.

Estudios recientes, como los de Acurio et al. (2024), en harinas de raíces andinas y matrices vegetales deshidratadas, han mostrado que la combinación de humedad y  $a_w$  es mucho más robusta que la humedad por sí sola para estimar la estabilidad durante el almacenamiento (do Carmo et al., 2026).

Desde una perspectiva fisicoquímica, la humedad total (%H) y la actividad de agua ( $a_w$ ) aportan información complementaria sobre la estabilidad de las harinas vegetales. Briceño-Sevillano et al. (2025), mencionan que mientras la humedad cuantifica la cantidad total de agua en la matriz, no se puede distinguir entre agua libre y agua fuertemente ligada a macromoléculas. Por otro lado, la actividad de agua refleja la energía libre de las moléculas de agua; es decir, qué tan disponible está su energía para participar en reacciones químicas, en la degradación enzimática o en el crecimiento microbiano. Por ello, una harina con %H elevada puede presentar  $a_w$  baja si gran parte del agua está retenida en la matriz alimentaria, mientras que otra harina con la misma humedad puede tener  $a_w$  elevada si contiene una mayor proporción de agua libre. La combinación de ambos parámetros, %H y  $a_w$ , permite estimar con precisión la movilidad molecular del agua, la susceptibilidad a procesos de deterioro físico, químico y microbiológico, y, asimismo, determinar la humedad de monocapa y de regiones de multicapa, determinantes para predecir la vida útil y la estabilidad de almacenamiento (Alamri et al., 2018).

**Tabla 5 .** Actividad de agua ( $a_w$ ) y contenido de humedad (%H) de las crucíferas después del secado.

| Tratamiento | Muestra  | $a_w$ final | %H final |
|-------------|----------|-------------|----------|
| Control     | Brócoli  | 0,4491      | 17,3431  |
|             | Coliflor | 0,5057      | 11,5030  |
|             | Col      | 0,4742      | 11,2273  |
| Ebullición  | Brócoli  | 0,4468      | 9,3431   |
|             | Coliflor | 0,4222      | 8,6469   |
|             | Col      | 0,4266      | 15,3969  |
| Vapor       | Brócoli  | 0,3952      | 13,3305  |
|             | Coliflor | 0,4448      | 16,5158  |
|             | Col      | 0,3323      | 16,6004  |
| Microondas  | Brócoli  | 0,4971      | 11,4552  |
|             | Coliflor | 0,5259      | 10,3870  |
|             | Col      | 0,2937      | 10,1602  |

Por otro lado, en la *Tabla 5* se observa que los pretratamientos de vapor y de microondas generaron algunos de los valores finales de  $a_w$  más bajos, en particular en la col. Esto se explica por dos mecanismos complementarios: el primero es el tratamiento térmico aplicado, que provoca el colapso parcial de la estructura celular de la matriz alimentaria, lo que facilita la salida de agua durante el proceso de secado.

Segundo, la desnaturalización de proteínas, la gelatinización parcial de fracciones amiláceas y la modificación de pectinas, que pueden reducir la disponibilidad de sitios capaces de retener el agua móvil. Por otro lado, estos mecanismos también pueden llegar a causar la creación de sitios hidrofílicos, dependiendo de la matriz; la respuesta de esta va a depender tanto de la composición específica de cada residuo, como de la cantidad de fibra soluble e insoluble dentro de las harinas de cada una de las crucíferas.

### **3.1.2 Rendimiento del secado y de la molienda como indicadores tecnológicos**

El rendimiento de secado presentado en la *Tabla 6* corresponde al obtenido tras eliminar una fracción de agua y de compuestos volátiles durante el proceso. En el control, el brócoli fue la crucífera que presentó el mayor rendimiento de secado, con 11,94 %, seguido de la col, con 9,65 %; estos resultados son coherentes con los valores de humedad inicial. La diferencia que se obtuvo también puede relacionarse con una menor densidad estructural de los tejidos de coliflor y con mayor proporción de agua retenida en las inflorescencias y espacios porosos (Jin & Van der Sman, 2022). En los residuos vegetales, el rendimiento de secado no debe interpretarse como la eficiencia de un proceso, puesto que un alto rendimiento no garantiza la conservación de la funcionalidad; las harinas con alto rendimiento pueden presentar una alta actividad de agua ( $a_w$ ) y una degradación de compuestos bioactivos.

La interpretación del rendimiento debe considerar parámetros como la actividad del agua, la humedad final y la integridad de los compuestos bioactivos para una evaluación óptima de la eficiencia del secado. Si analizamos los valores obtenidos en las muestras a las que se aplicaron los pretratamientos, se observa una clara disminución del rendimiento en la mayoría de los casos. Por ejemplo, si consultamos la *Tabla 6*, vemos que el rendimiento presentó un valor de 11,94 % en la muestra control, mientras que se obtuvo un 9,15 % en la muestra sometida a ebullición. Según Saini et al. (2023), esta reducción puede atribuirse a la pérdida de solutos hidrosolubles durante el escaldado, especialmente en ebullición, donde el contacto directo con la superficie de la matriz vegetal favorece la lixiviación de azúcares, minerales y compuestos fenólicos.

En el caso de la coliflor, los rendimientos fueron de 6,20 % en ebullición, 6,86 % en vapor y 7,60 % en microondas, lo que indica que el tratamiento por microondas conservó una mayor fracción sólida que el de ebullición. En el estudio realizado por Santos et al. (2025), mencionan que el tratamiento con microondas permite la eliminación rápida del agua sin contacto directo con solventes como el agua. La exposición de la crucífera durante 30 segundos aumentó la fracción sólida final, a diferencia de los tratamientos en agua, que provocan una lixiviación excesiva; esto explica por qué las harinas tratadas con microondas muestran un mayor rendimiento en comparación con las tratadas en agua a ebullición.

Así mismo, en el estudio realizado por Liet et al. (2025), se demuestra que la ebullición puede ser mucho más eficaz para inactivar enzimas, pero, por otro lado, compromete el rendimiento de los sólidos cuando se aplica a residuos ricos en componentes solubles. Además, el vapor actúa como un tratamiento menos extractivo, ya que no hay contacto directo con la crucífera, mientras que el microondas genera un calentamiento volumétrico con un tiempo de exposición más breve. Revisiones recientes sobre la valorización de residuos de brócoli, coliflor y col enfatizan que estos subproductos contienen fibra, compuestos fenólicos, glucosinolatos, proteínas y minerales con potencial funcional; por ende, las pérdidas durante el procesamiento pueden afectar no solo el rendimiento, sino también el valor nutricional de la matriz alimentaria final.

**Tabla 6.** Rendimiento del proceso de secado de las muestras de brócoli, coliflor y col.

| Tratamiento | Muestra  | Rendimiento (%) |
|-------------|----------|-----------------|
| Control     | Brócoli  | 11,94           |
|             | Coliflor | 6,49            |
|             | Col      | 9,65            |
| Ebullición  | Brócoli  | 9,15            |
|             | Coliflor | 6,20            |
|             | Col      | 6,94            |
| Vapor       | Brócoli  | 9,29            |
|             | Coliflor | 6,86            |
|             | Col      | 7,38            |
| Microondas  | Brócoli  | 9,29            |
|             | Coliflor | 7,60            |
|             | Col      | 7,95            |

Por otro lado, en la *Tabla 7* podemos observar el rendimiento obtenido por molienda, donde en casi todas las muestras se obtuvieron valores cercanos al 87 %. El brócoli control presentó el rendimiento más bajo, con 84,07 %, mientras que los tratamientos térmicos elevaron su recuperación hasta 94,87 % en ebullición, 99,61 % en vapor y 96,67 % en microondas. Este aumento en el rendimiento sugiere que los tratamientos térmicos y el secado posterior producen una matriz mucho más frágil y quebradiza facilitando la reducción del tamaño de la partícula de la harina (Araújo & Pena, 2020). En la coliflor, la muestra control alcanzó 96,58 %, mientras que la ebullición redujo el rendimiento a 87,81 %, posiblemente debido a una mayor adhesividad o a una mayor pérdida de la fracción fina durante la manipulación.

Según Barrial-Lujan et al. (2025), la molienda tiene relevancia directa sobre la adsorción de agua, una harina con un menor tamaño de partícula presenta una mayor área superficial específica y mayor exposición a grupos polares, y esto incrementa la velocidad de adsorción y modifica el equilibrio aparente si existen zonas porosas accesibles. No obstante, la relación entre granulometría y capacidad higroscópica no es lineal; las partículas más finas suelen compactarse, reducir los poros y dificultar la difusión del vapor hacia las zonas internas.

La estabilidad de una harina funcional depende de la interacción entre la humedad residual, la actividad de agua, la estructura del pulverizado y las condiciones ambientales. Un alto rendimiento de molienda facilita el escalamiento tecnológico, pero si la harina resultante es altamente higroscópica, requerirá envases con alta resistencia al vapor de agua.

**Tabla 7.** Rendimiento del proceso de molienda de las muestras de brócoli, coliflor y col.

| Tratamiento | Muestra  | Rendimiento (%) |
|-------------|----------|-----------------|
| Control     | Brócoli  | 84,07           |
|             | Coliflor | 96,58           |
|             | Col      | 95,81           |
| Ebullición  | Brócoli  | 94,87           |
|             | Coliflor | 87,81           |
|             | Col      | 98,09           |
| Vapor       | Brócoli  | 99,61           |
|             | Coliflor | 98,05           |
|             | Col      | 96,38           |
| Microondas  | Brócoli  | 97,67           |
|             | Coliflor | 98,08           |
|             | Col      | 100,00          |

### 3.1.3 Isotermas de adsorción de agua a 20, 30 y 40 °C

#### 3.1.3.1 Forma general de las isotermas y clasificación fisicoquímica

En las *Tablas 8, 9 y 10*, junto con las *Figuras 5 a 16*, se muestra el contenido de humedad en equilibrio ( $x_e$ ). Nótese que hay una tendencia ascendente de  $x_e$  en todas las matrices, comportamiento característico de los alimentos deshidratados ricos en biopolímeros hidrofílicos (Yadav & Mishra, 2023).

En general, la forma de las isothermas ante los diferentes pretratamientos es de tipo III, aunque en algunas combinaciones de matrices alimentarias y pretratamientos se observa una pendiente mucho más pronunciada en la zona de  $a_w$  alta (Briceño-Sevillano et al., 2025). La clasificación tipo III se refiere a una primera región de adsorción sobre sitios específicos de alta energía, seguida de la formación de multicapas y, por último, de la condensación capilar o de la adsorción en dominios amorfos. En harinas vegetales ricas en fibra, proteínas y carbohidratos, esta forma se origina por la heterogeneidad de sitios activos: grupos hidroxilo de celulosa, hemicelulosa y pectinas; grupos carbonilo y amino de proteínas; y solutos de bajo peso molecular capaces de modificar el potencial químico del agua (Silva et al., 2022).

Por otro lado, la región de  $a_w$  baja, cercana a 0,1188, corresponde a agua fuertemente retenida por interacciones específicas. En esta zona las moléculas de agua se unen a sitios polares mediante puentes de hidrógeno y fuerzas electrostáticas.

En la *Figura 5* se observa con mayor precisión la región intermedia, entre  $a_w$  de 0,3754 y 0,6964, que corresponde a una transición hacia el agua de multicapa. La región alta entre un  $a_w$  de 0,8140 y 0,8461 es mucho más notoria en la *Figura 12*, donde se observan incrementos abruptos de  $x_e$  asociados a la ocupación de los poros y a una mayor movilidad del agua. Este patrón concuerda con lo descrito por Roos (2024), que señala que las harinas vegetales y los polvos alimentarios pueden ajustarse a los modelos GAB y BET, empleados para interpretar la monocapa y la energía de adsorción.

### 3.1.3.2 Isothermas a 20 °C

El análisis del contenido de humedad en equilibrio a 20 °C del brócoli mostró que, en el control, el  $x_e$  fue de 0,1293 g agua/g sólido seco a una  $a_w$  de 0,1188, correspondiente al LiCl, y de 0,5907 g agua/g sólido seco a una  $a_w$  de 0,461, correspondiente al KCl. Esta amplitud indica una matriz con una alta capacidad de retención en la región de alta humedad relativa (*Figura 5*).

Para el pretratamiento por ebullición, los valores fueron menores en todo el intervalo, como se evidencia en la *Figura 6*. Desde aproximadamente 0,0577 g agua/g sólido seco hasta 0,3614 g agua/g sólido seco, y en el brócoli se observa una marcada reducción de la capacidad de adsorción de agua. El pretratamiento con vapor, por otro lado, presentó valores intermedios-altos de  $x_e$  (0,1218 a 0,4948 g agua/g sólido seco), mientras que el tratamiento con microondas osciló entre 0,0826 y 0,4654 g agua/g sólido seco.

Para el caso del brócoli, el tratamiento de ebullición fue el que más disminuyó la humedad de equilibrio, probablemente por la lixiviación de solutos hidrófilos y modificación de las estructuras proteicas y pectinas (Silva et al., 2021). Según Boateng (2024), la reducción de los sitios activos después de la ebullición implica una menor cantidad de agua retenida para una misma  $a_w$ , lo que favorece la estabilidad durante el almacenamiento, aunque a costa de la pérdida del potencial de los compuestos funcionales.

Por otro lado, al analizar la harina de coliflor almacenada a 20 °C, se observó que la muestra sin pretratamiento (control) presentó una  $x_e$  de 0,0458 a 0,4714 g agua/g sólido seco, mientras que la muestra sometida a vapor alcanzó un valor máximo de humedad en equilibrio de 0,4809 g agua/g sólido seco, a un  $a_w$  de 0,8461, correspondiente al cloruro de potasio (KCl). Es decir, la muestra sometida a contacto con el vapor fue capaz de absorber más agua del ambiente. En esta misma matriz vegetal, las muestras sometidas a ebullición alcanzaron una  $x_e$  de 0,4060 g agua/g sólido seco y las sometidas a microondas, 0,4349 g agua/g sólido seco, considerándose ambos valores intermedios.

Además, comparando las tres *Brassicas* estudiadas, las muestras tratadas de col con vapor presentaron los valores más altos de  $x_e$ , en el intervalo de actividad de agua de 0,12 a 0,85, como se evidencia en la *Figura 7*. Este resultado sugiere que el vapor abrió la estructura tisular sin provocar lixiviación por ebullición, exponiendo así los sitios hidrófilos previamente inaccesibles. Mientras que los valores observados en la coliflor se deben posiblemente a que tiene tejidos porosos y paredes ricas en pectinas, lo que aumenta considerablemente la accesibilidad de estos polímeros al vapor de agua (Cheng et al., 2025).

En cuanto a los ambientes generados en los frascos herméticos, se pudo observar que el cloruro de potasio (KCl) generó un ambiente con una humedad relativa (HR) aproximada de 85 %, el cloruro de potasio (KCl)  $HR \approx 85 \%$ , el sulfato de amonio  $((NH_4)_2SO_4)$   $HR \approx 81 \%$ , el yoduro de potasio (KI)  $\approx 70 \%$ , el cloruro de magnesio  $(MgCl_2)$   $HR \approx 38 \%$  y el cloruro de litio (LiCl)  $HR \approx 12 \%$ , lo que coincide con lo reportado previamente en bibliografía científica (Perazzini & Perazzini, 2022). Bajo estas condiciones, el contenido de humedad de equilibrio de la harina condiciona al agua absorbida hasta igualar la actividad de agua de la solución, alcanzando valores específicos de  $x_e$  correspondientes a cada humedad relativa (HR).

Por ejemplo, con la solución saturada de cloruro de potasio (KCl,  $HR \approx 85 \%$ ), la harina pudo adsorber agua hasta valores aproximados de  $x_e \approx 0,5\text{--}0,6$  g agua/g sólido seco, mientras que con cloruro de litio (LiCl,  $HR \approx 12 \%$ ) el  $x_e$  se mantuvo en  $\approx 0,03\text{--}0,12$  g agua/g sólido seco. Es decir, en este último caso, si la harina tiene una humedad inicial superior al 12%, se observará que la harina cederá humedad al medio hasta alcanzar el punto de equilibrio.

El análisis de esta sección indica que el tratamiento térmico previo al secado influye en las condiciones de secado y, por ende, en la forma en que la harina resultante adsorbe agua durante su almacenamiento. En el caso específico del pretratamiento con vapor se observó que este pretratamiento puede incrementar la higroscopicidad de la harina resultante, ya que expone los grupos polares sin eliminarlos, lo que permite que la interacción con el agua alcance un equilibrio estable entre la matriz y el ambiente controlado por la sal (Martins-Vieira et al., 2022).

**Tabla 8.** Contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) en función de  $a_w$  de crucíferas sometidas a diferentes tratamientos térmicos a 20 °C.

| Tratamiento | Control        |                                          | Ebullición     |                                          | Vapor          |                                          | Microondas     |                                          |
|-------------|----------------|------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|
| Muestra     | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) |
| Brócoli     | 0,1188         | 0,1293 ± 0,0015                          | 0,1188         | 0,0577 ± 0,0066                          | 0,1188         | 0,1218 ± 0,0006                          | 0,1188         | 0,0826 ± 0,0123                          |
|             | 0,3754         | 0,1772 ± 0,0185                          | 0,3754         | 0,0837 ± 0,0021                          | 0,3754         | 0,1842 ± 0,0041                          | 0,3754         | 0,1131 ± 0,0045                          |
|             | 0,6964         | 0,3178 ± 0,0030                          | 0,6964         | 0,2240 ± 0,0050                          | 0,6964         | 0,3144 ± 0,0027                          | 0,6964         | 0,2835 ± 0,0029                          |
|             | 0,8140         | 0,4773 ± 0,0094                          | 0,8140         | 0,3142 ± 0,0042                          | 0,8140         | 0,4219 ± 0,0094                          | 0,8140         | 0,3785 ± 0,0046                          |
|             | 0,8461         | 0,5907 ± 0,0052                          | 0,8461         | 0,3614 ± 0,0070                          | 0,8461         | 0,4948 ± 0,0057                          | 0,8461         | 0,4654 ± 0,0045                          |
| Coliflor    | 0,1188         | 0,0458 ± 0,0013                          | 0,1188         | 0,0445 ± 0,0012                          | 0,1188         | 0,1452 ± 0,0027                          | 0,1188         | 0,0766 ± 0,0122                          |
|             | 0,3754         | 0,0831 ± 0,0003                          | 0,3754         | 0,0741 ± 0,0018                          | 0,3754         | 0,1900 ± 0,0008                          | 0,3754         | 0,0930 ± 0,0045                          |
|             | 0,6964         | 0,2247 ± 0,0072                          | 0,6964         | 0,2332 ± 0,0055                          | 0,6964         | 0,3443 ± 0,0016                          | 0,6964         | 0,2050 ± 0,0051                          |
|             | 0,8140         | 0,3629 ± 0,0034                          | 0,8140         | 0,3018 ± 0,0005                          | 0,8140         | 0,4656 ± 0,0030                          | 0,8140         | 0,3452 ± 0,0045                          |
|             | 0,8461         | 0,4714 ± 0,0084                          | 0,8461         | 0,4060 ± 0,0028                          | 0,8461         | 0,4809 ± 0,0081                          | 0,8461         | 0,4349 ± 0,0044                          |
| Col         | 0,1188         | 0,0593 ± 0,0023                          | 0,1188         | 0,1236 ± 0,0011                          | 0,1188         | 0,1887 ± 0,0011                          | 0,1188         | 0,0647 ± 0,0029                          |
|             | 0,3754         | 0,0957 ± 0,0004                          | 0,3754         | 0,1623 ± 0,0003                          | 0,3754         | 0,2335 ± 0,0085                          | 0,3754         | 0,0929 ± 0,0095                          |
|             | 0,6964         | 0,2151 ± 0,0008                          | 0,6964         | 0,3220 ± 0,0032                          | 0,6964         | 0,4128 ± 0,0080                          | 0,6964         | 0,2610 ± 0,0044                          |
|             | 0,8140         | 0,3372 ± 0,0097                          | 0,8140         | 0,4758 ± 0,0020                          | 0,8140         | 0,5653 ± 0,0069                          | 0,8140         | 0,3871 ± 0,0044                          |
|             | 0,8461         | 0,4397 ± 0,0033                          | 0,8461         | 0,5741 ± 0,0023                          | 0,8461         | 0,6739 ± 0,0021                          | 0,8461         | 0,4797 ± 0,0044                          |

**Figura 5.** *Isotermas de adsorción de agua en harinas de crucíferas sin pretratamiento (control) 20 °C.*

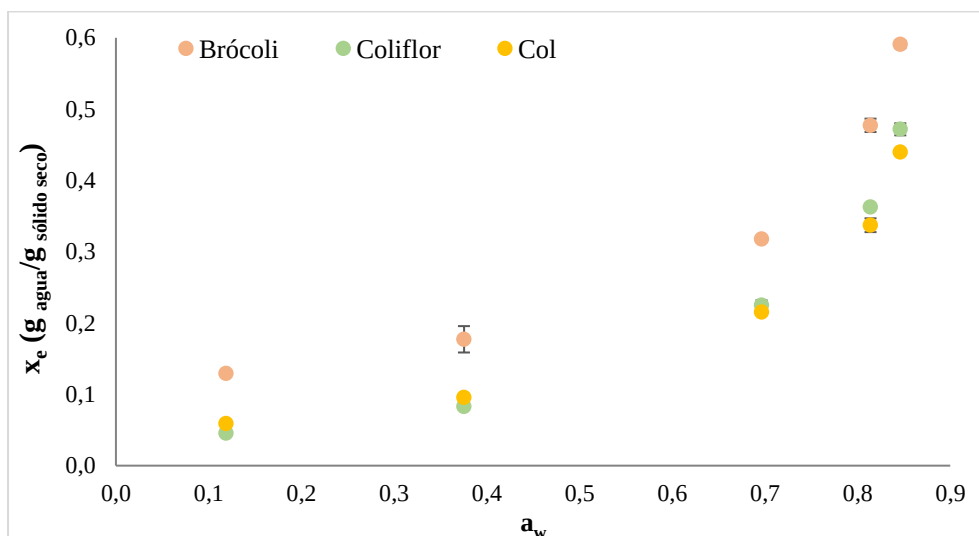


**Figura 6.** *Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a ebullición a 20 °C.*

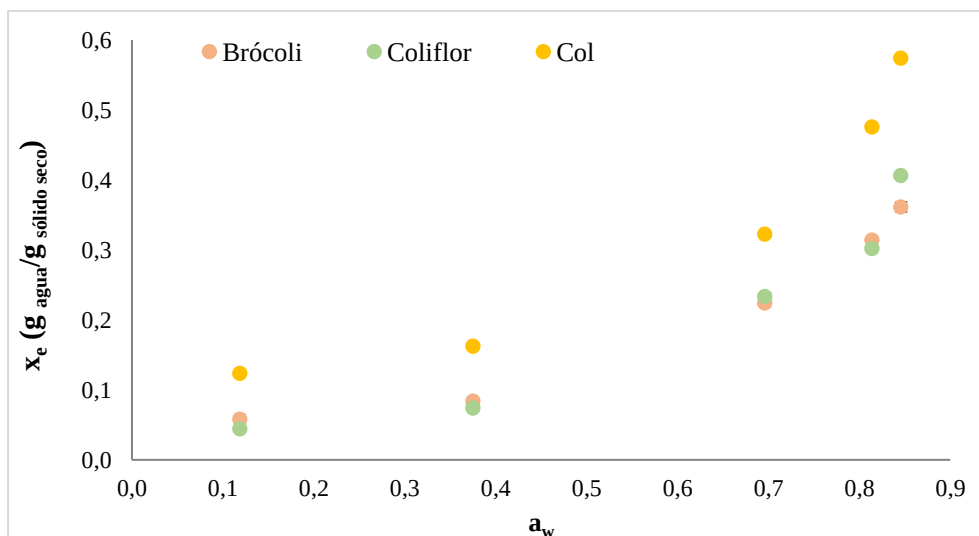


**Figura 7.** *Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a vapor a 20 °C.*

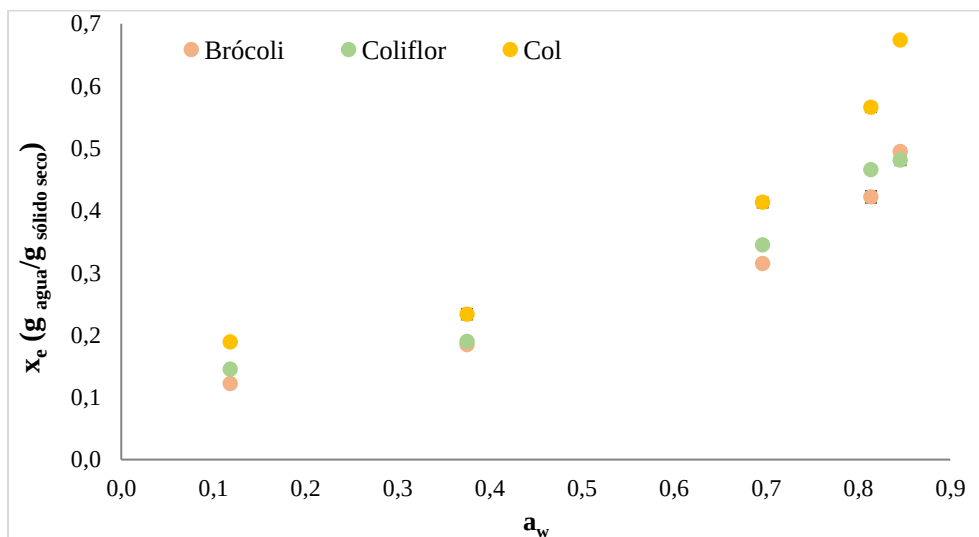
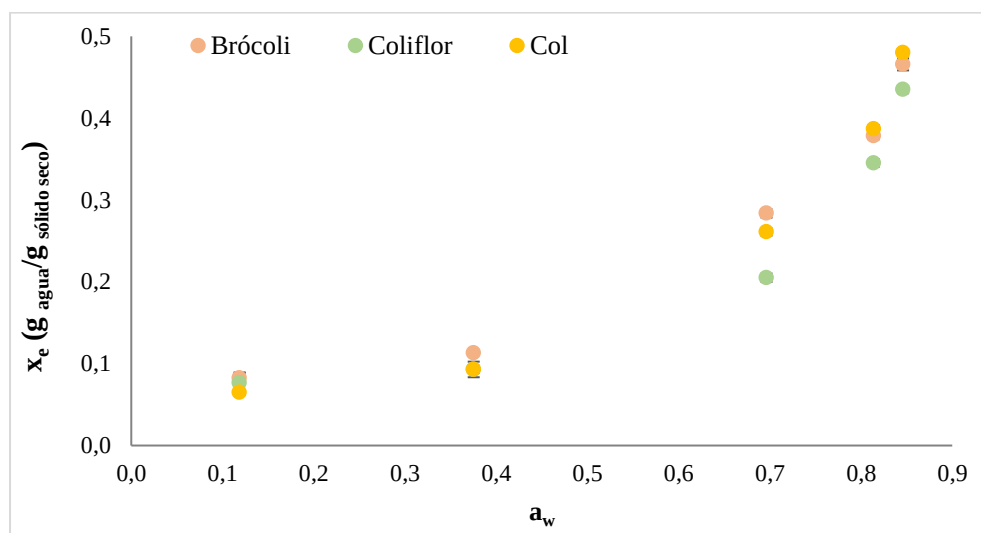


**Figura 8.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a microondas a 20 °C.



### 3.1.3.3 Isotermas a 30 °C

En la Tabla 9 se presentan los valores de la humedad en equilibrio ( $x_e$ ) de las harinas almacenadas a 30 °C. Se observa que la muestra de brócoli sin pretratamiento presentó una elevada adsorción, con valores de  $x_e$  entre 0,1256 y 0,6413 g agua/g de sólido seco.

La ebullición continuó mostrando los valores de  $x_e$  más bajos (0,0596 y 0,3629 g agua/g sólido seco). Mientras que al pretratar el brócoli con vapor alcanzó 0,05038 g agua/g sólido seco y con microondas 0,5327 g agua/g sólido seco, a una  $a_w$  de 0,8461. En comparación con la de 20°C, el brócoli control aumentó su  $x_e$  en la zona alta, como se puede observar en la *Figura 9*, especialmente a  $a_w$  de 0,81 y 0,85, correspondientes al sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y al cloruro de potasio (KCl), respectivamente (KCl). Este comportamiento puede parecer distinto de la tendencia clásica de disminución de la humedad de equilibrio con el aumento de la temperatura a una  $a_w$  constante. Sin embargo, en matrices vegetales, do Carmo et al. (2025), indican que el incremento térmico puede inducir una relajación estructural, una mayor movilidad de las cadenas poliméricas y la apertura de sitios previamente restringidos. Por ende, si la temperatura favorece el aumento de volumen, la adsorción puede aumentar en la región de alta  $a_w$ .

Por otro lado, en cuanto a la coliflor a 30°C, la muestra sin pretratamiento presentó valores más altos de  $x_e$  que la de 20°C, alcanzando 0,5144 g agua/g sólido seco. El incremento de  $x_e$  a 30 °C puede estar vinculado, según los resultados presentados por Tavares et al. (2023), a la presencia de dominios amorfos que, al aumentar la temperatura, permiten una mayor penetración del vapor y una reorganización molecular. Estudios recientes en polvos vegetales y matrices alimentarias han reportado que el comportamiento de las isotermas puede depender de las transiciones físicas del sólido, y no solo de la energía cinética del agua.

Por otro lado, la col a 30 °C, mostró el comportamiento más higroscópico frente a los demás tratamientos térmicos. A una  $a_w$  de 0,8461, los valores de  $x_e$  fueron: 0,5100 g agua/g sólido seco en control, 0,6145 g agua/g sólido seco en ebullición, 0,7321 g agua/g sólido seco en vapor y 0,5351 g agua/g sólido seco en microondas.

Se observa que la col tratada con vapor presentó el mayor valor de  $x_e$  entre todos los valores a 30 °C (*Tabla 9*). Esta respuesta indica que el tratamiento con vapor produjo una matriz altamente afín al agua, posiblemente debido a la alteración de la estructura foliar, la exposición de la celulosa, la hemicelulosa, y la generación de microcapilares. En la práctica, esta harina requeriría condiciones de almacenamiento más estrictas, especialmente con una humedad relativa inferior al nivel intermedio, para evitar una absorción acelerada de agua (Hosseininejad et al., 2024).

**Tabla 9.** Contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) en función de  $a_w$  de crucíferas sometidas a diferentes tratamientos térmicos a 30 °C.

| Tratamiento     | Control |                                 | Ebullición |                                 | Vapor  |                                 | Microondas |                                 |
|-----------------|---------|---------------------------------|------------|---------------------------------|--------|---------------------------------|------------|---------------------------------|
| Muestra         | $a_w$   | $x_e$<br>(g agua/g sólido seco) | $a_w$      | $x_e$<br>(g agua/g sólido seco) | $a_w$  | $x_e$<br>(g agua/g sólido seco) | $a_w$      | $x_e$<br>(g agua/g sólido seco) |
| <b>Brócoli</b>  | 0,1188  | 0,1256 ± 0,0015                 | 0,1188     | 0,0596 ± 0,0076                 | 0,1188 | 0,1206 ± 0,0026                 | 0,1188     | 0,0987 ± 0,0078                 |
|                 | 0,3754  | 0,1714 ± 0,0100                 | 0,3754     | 0,0917 ± 0,0012                 | 0,3754 | 0,1544 ± 0,0043                 | 0,3754     | 0,1176 ± 0,0042                 |
|                 | 0,6964  | 0,3110 ± 0,0021                 | 0,6964     | 0,2384 ± 0,0047                 | 0,6964 | 0,2497 ± 0,0031                 | 0,6964     | 0,3157 ± 0,0032                 |
|                 | 0,8140  | 0,5153 ± 0,0066                 | 0,8140     | 0,3186 ± 0,0028                 | 0,8140 | 0,4329 ± 0,0029                 | 0,8140     | 0,4183 ± 0,0071                 |
|                 | 0,8461  | 0,6413 ± 0,0083                 | 0,8461     | 0,3629 ± 0,0058                 | 0,8461 | 0,5038 ± 0,0048                 | 0,8461     | 0,5327 ± 0,0034                 |
| <b>Coliflor</b> | 0,1188  | 0,0834 ± 0,0028                 | 0,1188     | 0,0497 ± 0,0011                 | 0,1188 | 0,1411 ± 0,0019                 | 0,1188     | 0,0777 ± 0,0102                 |
|                 | 0,3754  | 0,1556 ± 0,0023                 | 0,3754     | 0,0909 ± 0,0013                 | 0,3754 | 0,1707 ± 0,0021                 | 0,3754     | 0,0926 ± 0,0039                 |
|                 | 0,6964  | 0,2225 ± 0,0031                 | 0,6964     | 0,2939 ± 0,0038                 | 0,6964 | 0,3133 ± 0,0028                 | 0,6964     | 0,2704 ± 0,0047                 |
|                 | 0,8140  | 0,3901 ± 0,0017                 | 0,8140     | 0,3647 ± 0,0062                 | 0,8140 | 0,4851 ± 0,0032                 | 0,8140     | 0,3946 ± 0,0046                 |
|                 | 0,8461  | 0,5144 ± 0,0052                 | 0,8461     | 0,4705 ± 0,0032                 | 0,8461 | 0,5534 ± 0,0051                 | 0,8461     | 0,5282 ± 0,0056                 |
| <b>Col</b>      | 0,1188  | 0,0852 ± 0,0056                 | 0,1188     | 0,1243 ± 0,0008                 | 0,1188 | 0,1581 ± 0,0009                 | 0,1188     | 0,0739 ± 0,0059                 |
|                 | 0,3754  | 0,0946 ± 0,0010                 | 0,3754     | 0,1745 ± 0,0010                 | 0,3754 | 0,1826 ± 0,0044                 | 0,3754     | 0,0921 ± 0,0051                 |
|                 | 0,6964  | 0,2133 ± 0,0042                 | 0,6964     | 0,3902 ± 0,0045                 | 0,6964 | 0,4562 ± 0,0040                 | 0,6964     | 0,3313 ± 0,0067                 |
|                 | 0,8140  | 0,3943 ± 0,0074                 | 0,8140     | 0,5189 ± 0,0102                 | 0,8140 | 0,6197 ± 0,0056                 | 0,8140     | 0,4445 ± 0,0057                 |
|                 | 0,8461  | 0,5100 ± 0,0033                 | 0,8461     | 0,6145 ± 0,0019                 | 0,8461 | 0,7321 ± 0,0065                 | 0,8461     | 0,5351 ± 0,0068                 |

**Figura 9.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sin pretratamiento (control) a 30 °C.

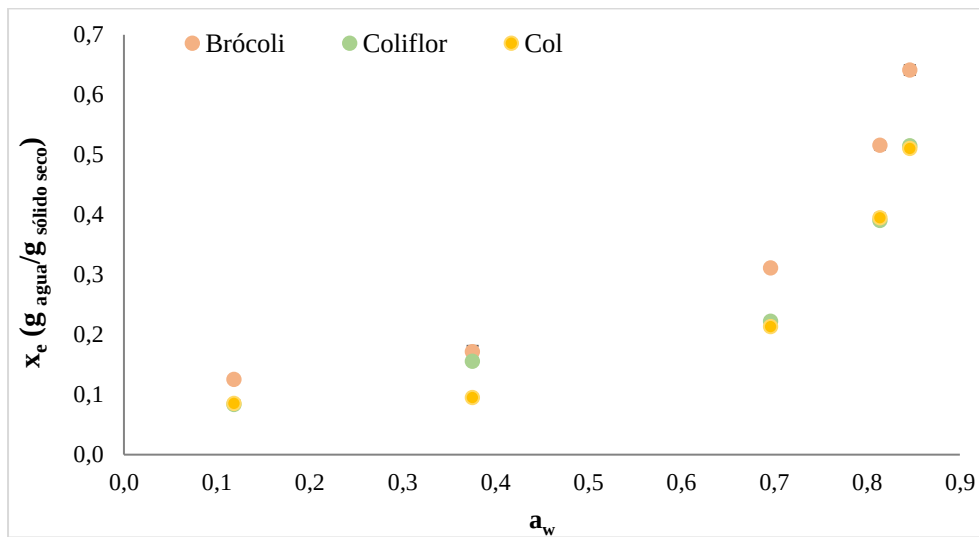


**Figura 10.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a ebullición a 30 °C.

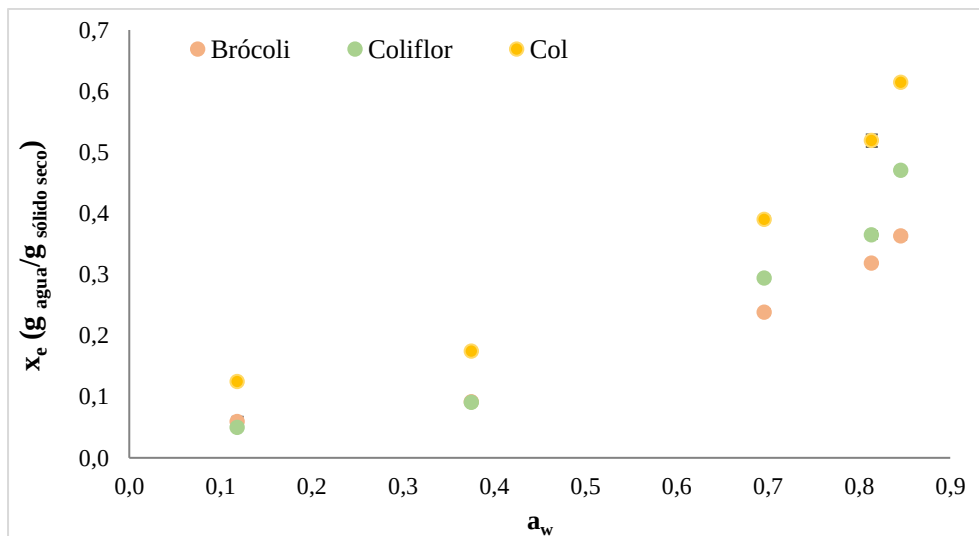


**Figura 11.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a vapor a 30 °C.

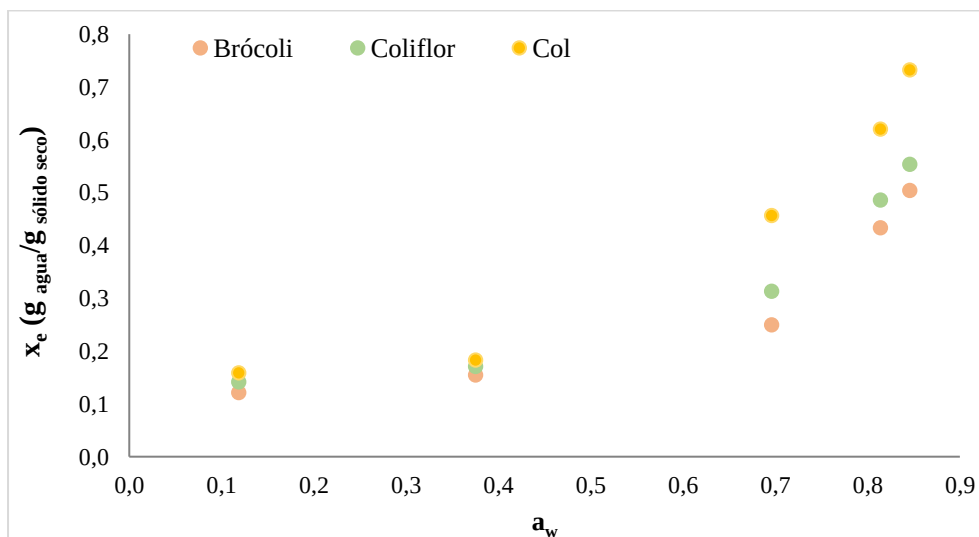
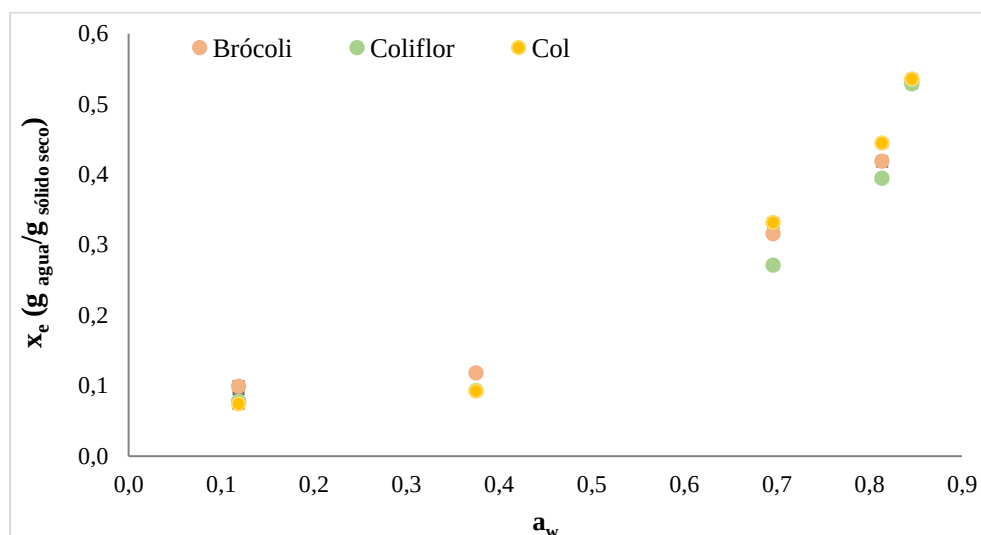


**Figura 12.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a microondas a 30 °C.



### 3.1.3.4 Isotermas a 40 °C

Los datos a 40 °C se presentan en la *Tabla 10*, y en las *Figuras 13* a la *16*. En el brócoli control, el  $x_e$  aumentó desde 0,1655 g agua/g sólido seco a una  $a_w$  de 0,3754, correspondiente al cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ), hasta 0,7609 g agua/g sólido seco a una  $a_w$  de 0,8539, correspondiente al cloruro de litio ( $LiCl$ ). Esta muestra evidencia un comportamiento atípico, ya que por lo general esta sal tiene una  $a_w$  mucho más baja. Los valores presentados en la *Tabla 10* superan a los registrados a las temperaturas de 20 °C y 30 °C, lo que confirma una fuerte sensibilidad de la matriz control a condiciones combinadas de alta temperatura y de sales saturadas con alta  $a_w$ . En la ebullición, el brócoli se mantuvo con valores bajos, de 0,06 a 0,36 g agua/g sólido seco; en el vapor alcanzó 0,51 g agua/g sólido seco y en la microondas llegó a 0,6 g agua/g sólido seco. El microondas mostró una mayor adsorción que el vapor en la zona de  $a_w$  alta, lo que podría asociarse con daño celular interno y con la formación de poros por calentamiento.

En la coliflor a 40°C, el control alcanzó 0,71 g agua/g sólido seco a un  $a_w$  de 0,8539, mientras que, en la ebullición, el vapor y la microondas alcanzaron 0,54, 0,63 y 0,62 g agua/g sólido seco, respectivamente. De acuerdo con Karataş & Arslan (2022), la diferencia entre tratamientos suele reducirse en la zona de  $a_w$  alta, debido a que el mecanismo dominante deja de depender exclusivamente de sitios específicos y pasa a estar controlado por la adsorción en la matriz. Cuando la HR aumenta, la matriz presenta una mayor movilidad y la distinción entre sitios activos de alta y baja energía se vuelve menos marcada.

Por otro lado, en la col a 40 °C el control alcanzó valores de 0,77 g agua/g sólido seco a  $a_w$  de 0,8539; ebullición 0,6549 g agua/g sólido seco; vapor 0,7903 g agua/g sólido seco; y microondas 0,5904 g agua/g sólido seco a  $a_w$  0,8461. La col tratada con vapor volvió a presentar el mayor valor entre los tratamientos, lo que refuerza la idea de que el vapor incrementa la accesibilidad estructural. Esto indica que, si esta harina se almacena en ambientes de alta HR, puede adsorber una cantidad suficiente de agua para modificar el apelmazamiento, la estabilidad química y la susceptibilidad microbiológica (Zhao et al., 2025).

**Tabla 10.** Contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) en función de  $a_w$  de crucíferas sometidas a diferentes tratamientos térmicos a 40 °C.

| Tratamiento |                | Control                                  |                | Ebullición                               |                | Vapor                                    |                | Microondas                               |  |
|-------------|----------------|------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|--|
| Muestra     | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) | a <sub>w</sub> | X <sub>e</sub><br>(g agua/g sólido seco) |  |
| Brócoli     | 0,3754         | 0,1655 ± 0,0015                          | 0,1188         | 0,0615 ± 0,0085                          | 0,1188         | 0,1193 ± 0,0046                          | 0,1188         | 0,1147 ± 0,0032                          |  |
|             | 0,6964         | 0,3042 ± 0,0012                          | 0,3754         | 0,0997 ± 0,0003                          | 0,3754         | 0,1246 ± 0,0045                          | 0,3754         | 0,1221 ± 0,0038                          |  |
|             | 0,814          | 0,5532 ± 0,0021                          | 0,6964         | 0,2528 ± 0,0054                          | 0,6964         | 0,3553 ± 0,0036                          | 0,6964         | 0,3478 ± 0,0035                          |  |
|             | 0,8461         | 0,6919 ± 0,0067                          | 0,8140         | 0,3230 ± 0,0015                          | 0,8140         | 0,4438 ± 0,0042                          | 0,8140         | 0,4581 ± 0,0095                          |  |
|             | 0,8539         | 0,7609 ± 0,0099                          | 0,8461         | 0,3643 ± 0,0045                          | 0,8461         | 0,5128 ± 0,0038                          | 0,8461         | 0,6000 ± 0,0042                          |  |
| Coliflor    | 0,3754         | 0,0836 ± 0,0043                          | 0,1188         | 0,0549 ± 0,0009                          | 0,1188         | 0,1370 ± 0,0010                          | 0,1188         | 0,0788 ± 0,0081                          |  |
|             | 0,6964         | 0,2203 ± 0,0089                          | 0,3754         | 0,1076 ± 0,0008                          | 0,3754         | 0,1514 ± 0,0036                          | 0,3754         | 0,0952 ± 0,0033                          |  |
|             | 0,814          | 0,4173 ± 0,0034                          | 0,6964         | 0,3545 ± 0,0020                          | 0,6964         | 0,2822 ± 0,0039                          | 0,6964         | 0,3358 ± 0,0042                          |  |
|             | 0,8461         | 0,5574 ± 0,0020                          | 0,8140         | 0,4276 ± 0,0118                          | 0,8140         | 0,5046 ± 0,0034                          | 0,8140         | 0,4440 ± 0,0017                          |  |
|             | 0,8539         | 0,7107 ± 0,0017                          | 0,8461         | 0,5349 ± 0,0035                          | 0,8461         | 0,6259 ± 0,0021                          | 0,8461         | 0,6214 ± 0,0068                          |  |
| Col         | 0,3754         | 0,0935 ± 0,0029                          | 0,1188         | 0,1250 ± 0,0004                          | 0,1188         | 0,1765 ± 0,0003                          | 0,1188         | 0,0830 ± 0,0088                          |  |
|             | 0,6964         | 0,2114 ± 0,0017                          | 0,3754         | 0,1867 ± 0,0017                          | 0,3754         | 0,1920 ± 0,0037                          | 0,3754         | 0,0913 ± 0,0093                          |  |
|             | 0,814          | 0,4514 ± 0,0121                          | 0,6964         | 0,4583 ± 0,0057                          | 0,6964         | 0,5454 ± 0,0035                          | 0,6964         | 0,4016 ± 0,0090                          |  |
|             | 0,8461         | 0,5834 ± 0,0051                          | 0,8140         | 0,5619 ± 0,0184                          | 0,8140         | 0,6741 ± 0,0042                          | 0,8140         | 0,5019 ± 0,0070                          |  |
|             | 0,8539         | 0,7721 ± 0,0032                          | 0,8461         | 0,6549 ± 0,0014                          | 0,8461         | 0,7903 ± 0,0109                          | 0,8461         | 0,5904 ± 0,0097                          |  |

**Figura 13.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sin pretratamiento (control) a 40 °C.

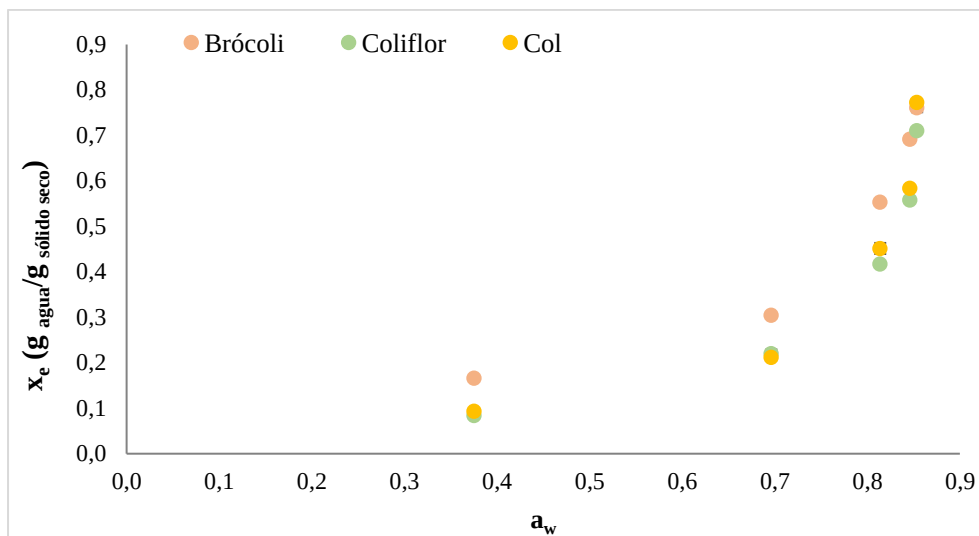


**Figura 14.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a ebullición a 40 °C.

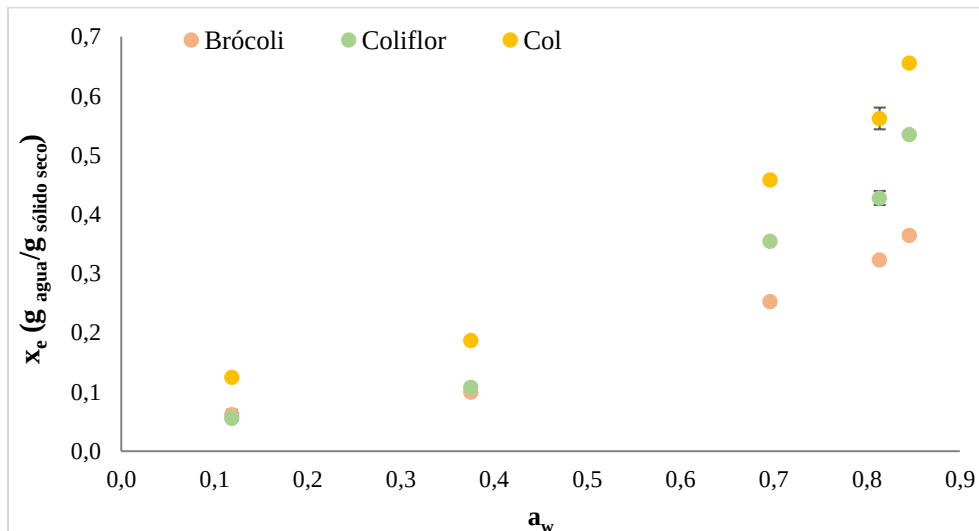


**Figura 15.** Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a vapor a 40 °C.

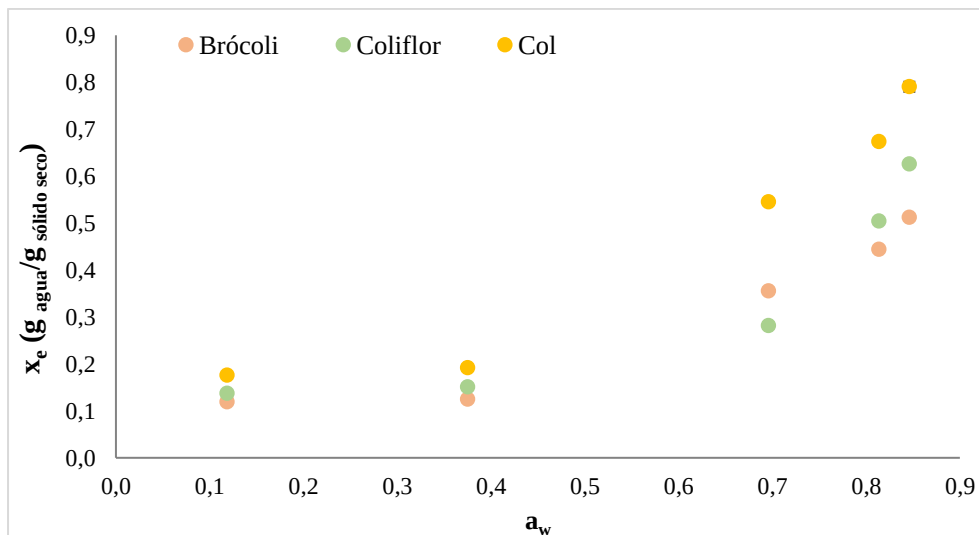
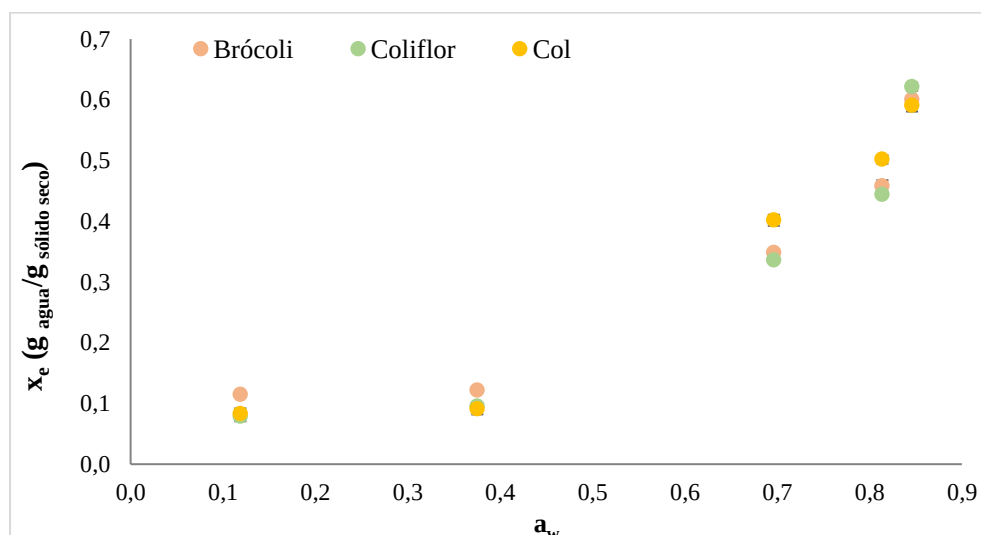


**Figura 16.** *Isotermas de adsorción de agua de harinas de crucíferas sometidas a microondas a 40 °C.*



### 3.1.3.5 Efecto de la temperatura sobre la adsorción

La comparación de temperaturas de 20, 30 y 40 °C muestra que la temperatura no produjo una respuesta uniforme en todas las matrices, según el análisis de las isotermas. Teóricamente, con el aumento de la temperatura, las moléculas de agua adquieren más energía cinética y la cantidad de sustancia adsorbida a una actividad de agua ( $a_w$ ) dada disminuye a medida que se debilita la interacción agua-sólido. Sin embargo, los datos muestran un aumento del contenido de  $x_e$  en varias muestras, especialmente en la región de valores altos de  $a_w$  (Aviara & Aviara, 2020).

Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza dinámica de la harina vegetal. Pérez-Pirotto et al. (2022), señalan que, a temperaturas más altas, las cadenas poliméricas de fibras, pectinas y carbohidratos pueden relajarse, exponiendo regiones internas y permitiendo una mejor penetración del agua. Por lo tanto, la adsorción observada es el resultado de dos fuerzas opuestas: el debilitamiento de los enlaces individuales y el aumento de la accesibilidad estructural. Para ello, debemos considerar que las harinas a partir de crucíferas no son superficies inertes; se trata de un sistema de biopolímeros en el que la temperatura altera simultáneamente la movilidad molecular, el volumen libre, la capilaridad y la accesibilidad de los grupos polares. Por lo tanto, el cambio en la concentración de  $x_e$  con la temperatura debe considerarse un fenómeno asociado a la adsorción y a la transición estructural.

### 3.1.4 Calor isostérico neto de adsorción

#### 3.1.4.1 Fundamento termodinámico

El calor isostérico neto de adsorción representa la energía adicional asociada a la unión del agua a la matriz sólida en comparación con el agua pura. Su cálculo se basa en la ecuación de Clausius–Clapeyron [Ec.2].

En esta relación, se grafica la pendiente del  $\ln(a_w)$  frente al  $1/T$  en grados kelvin, lo cual permite estimar el calor isostérico neto a diferentes valores de  $x_e$  teóricos. Desde el punto de vista físico, el calor isostérico ( $q_{st}$ ) alto indica sitios de adsorción energéticamente intensos y el  $q_{st}$  bajo indica por otro lado una afinidad más débil de agua retenida y más cercano al comportamiento del agua libre (Alpizar-Reyes et al., 2018).

Las Figuras 17 a 20 muestran que el  $q_{st}$  disminuye conforme aumenta el contenido de humedad, esta tendencia es termodinámicamente esperada. De acuerdo Aviara (2020), con bajos contenidos de humedad, las primeras moléculas de agua ocupan sitios con mayor energía de adsorción: grupos hidroxilo de polisacáridos, grupos carboxilo de pectinas, grupos amino y carbonilo de proteínas y superficies minerales. En esta región, el agua se encuentra fuertemente asociada a la matriz a medida que aumenta el  $x_e$  estos sitios activos se saturan por medio de las sales, que se usan como factor higroscópico, y el agua adicional se une sobre las moléculas previamente adsorbidas, con menor energía diferencial. En la zona de alta humedad, el agua se comporta como multicapa o agua capilar, y un  $q_{st}$  que tiende a valores más bajos.

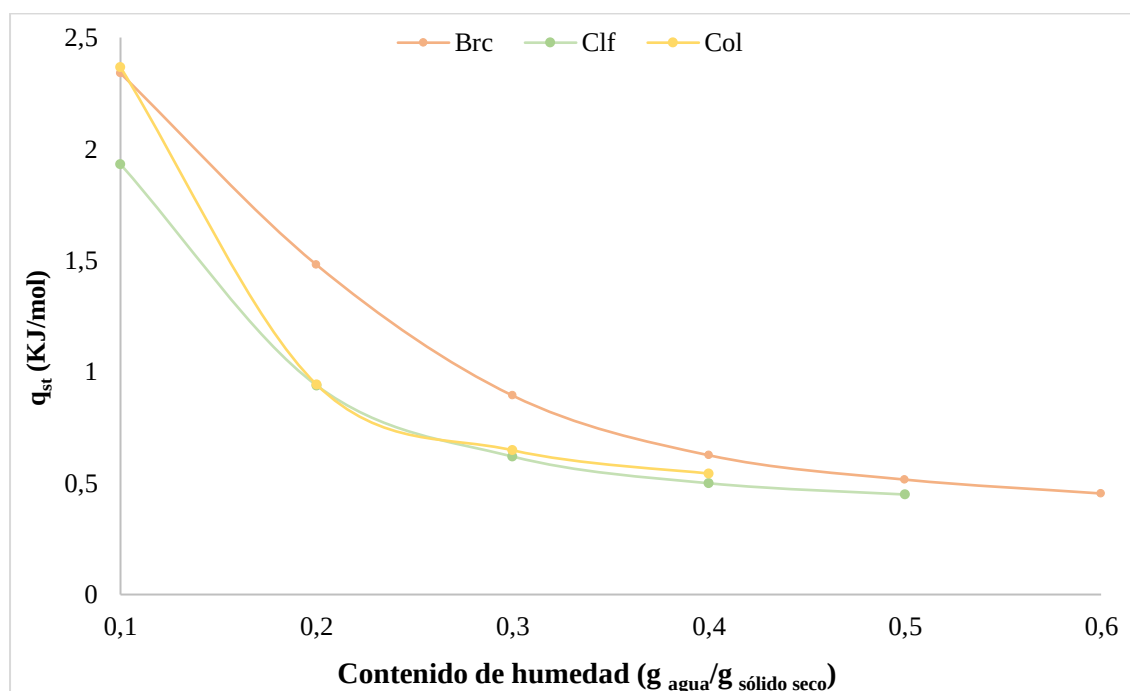
#### 3.1.4.2 Muestras control

En las muestras de control de la Figura 17, los valores de  $q_{st}$  fueron mayores a los contenidos de humedad más bajos. Para el brócoli, el  $q_{st}$  disminuyó de 2,3394 kJ/mol a  $x_e = 0,1$  g agua/g sólido seco a 0,4535 kJ/mol a  $x_e = 0,6$  g agua/g sólido seco. En el caso de la coliflor, el valor del  $q_{st}$  descendió de 1,9313 kJ/mol a 0,4490 kJ/mol, y en la col de 2,3664 kJ/mol a 0,5429 kJ/mol, en el intervalo de valores de  $x_e$  de 0,09 g agua/g sólido seco a 0,47 g agua/g sólido seco.

La col y el brócoli presentaron los valores iniciales más altos, lo que indica una mayor densidad o intensidad de sitios de alta energía en ausencia de tratamiento. Esta mayor energía puede relacionarse con estructuras fibrosas y proteicas menos alteradas por calor, donde los grupos polares permanecen disponibles y con una mejor capacidad de formar interacciones específicas con el agua (Boucheham et al., 2019)

Bamisaye et al. (2024), reportó que la caída de  $q_{st}$  entre  $x_e = 0,1$  g agua/g sólido seco y  $x_e = 0,3$  g agua/g sólido seco se debe a que la fracción de sitios más energéticos se satura a bajas humedades. Después de esa zona, la incorporación de agua requiere menos energía, lo cual se debe principalmente a las capas ya hidratadas. Esta transición tiene una implicación tecnológica: mantener las harinas con un contenido de humedad bajo. Esto no solo reduce la  $a_w$ , sino que también conserva el agua en la fracción fuertemente retenida y de baja movilidad. De modo que, cuando la humedad supera las regiones de monocapa y multicapas iniciales, la movilidad aumenta y acelera el riesgo de reacciones que deterioren la matriz alimentaria.

**Figura 17.** Calor isostérico neto de adsorción a diferentes contenidos de humedad en muestras control.



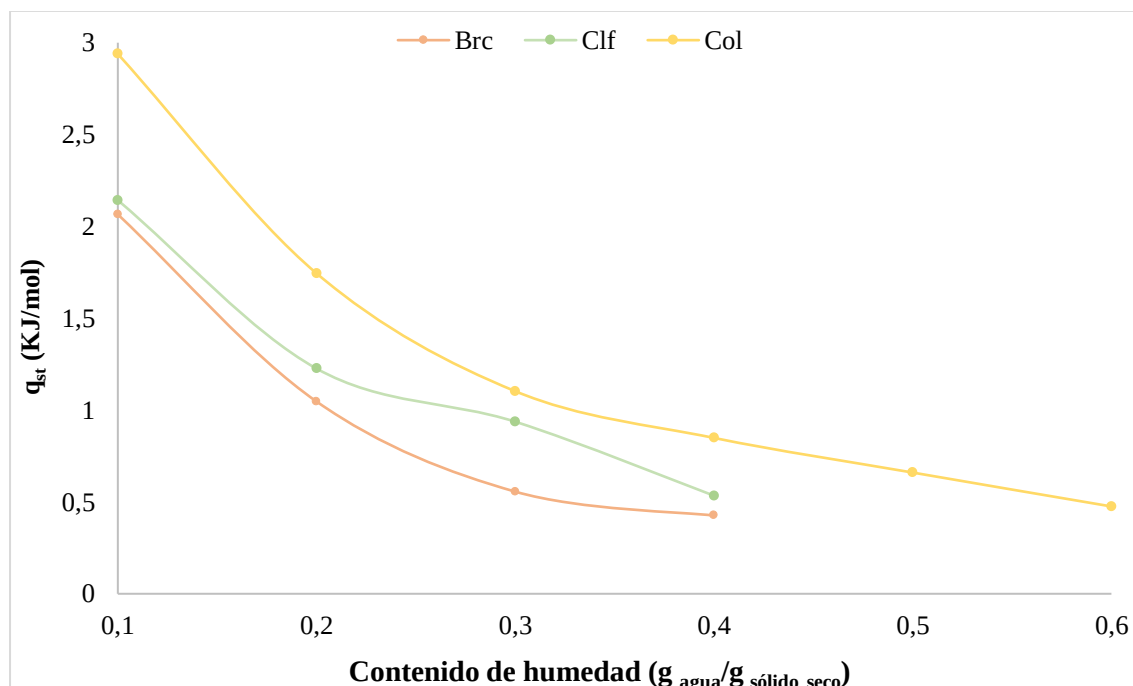
*Nota.* Las siglas Brc, Clf y Col corresponde a las tres crucíferas de estudio: brócoli, coliflor y col. Elaboración Propia

### 3.1.4.3 Tratamiento por ebullición

En la *Figura 18* se observa el calor isostérico neto de adsorción, en el que la col presentó el mayor  $q_{st}$  inicial, con 2,9388 kJ/mol a  $x_e = 0,1$  g agua/g sólido seco, seguida por la coliflor con 2,1426 kJ/mol y el brócoli con 2,0653 kJ/mol. La mayor energía inicial de la col sugiere que, aunque la ebullición reduce algunos sitios debido a la lixiviación, también puede concentrar o exponer sitios residuales de alta afinidad en la matriz. Para el caso del brócoli, la curva desciende hasta 0,4257 kJ/mol; en la coliflor, hasta 0,5340; y en la col, hasta 0,4753 a  $x_e = 0,6$  g agua/g sólido seco. La reducción progresiva confirma que la ebullición no elimina el patrón termodinámico fundamental de adsorción, pero si modifica la distribución energética de los sitios activos (Arslan-Tontul, 2020).

La ebullición implica un contacto directo con agua en su punto de ebullición, que, para la región donde se realizó el estudio, es de 92 °C; por ende, esta energía es suficiente para remover solutos hidrófilos y alterar la matriz péptica. Mahalaxmi et al. (2022), reportaron que la remoción reduce la capacidad total de adsorción observada en las isothermas, pero los sitios remanentes pueden ser energéticamente intensos. Por ello, no existe contradicción entre un menor valor de  $x_e$  y un  $q_{st}$  inicial relativamente alto: la muestra puede adsorber menos agua. Sin embargo, según, (Gichau et al., 2019b), las primeras moléculas que adsorben el agua total lo hacen en los sitios específicos afectados por los pretratamientos, cambiando así la estructura de las moléculas y facilitando su unión.

**Figura 18.** Calor neto de adsorción isostérico a diferentes contenidos de humedad en muestras sometidas a ebullición.



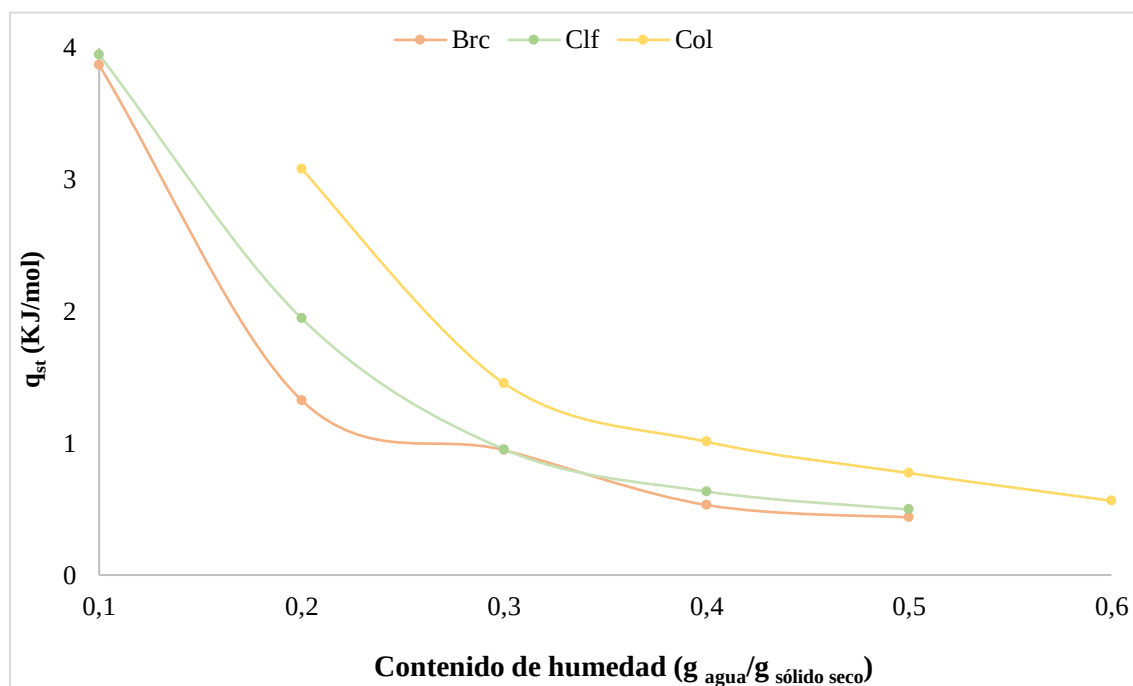
*Nota.* Las siglas Brc, Clf y Col corresponde a las tres crucíferas de estudio: brócoli, coliflor y col. Elaboración Propia

### 3.1.4.4 Tratamiento por vapor

El tratamiento con vapor presentó los valores iniciales más altos de  $q_{st}$  entre todos los pretratamientos para el brócoli y la coliflor: 3,8685 y 3,9475 kJ/mol a  $x_e = 0,1$  g agua/g sólido seco, respectivamente (Figura 19). Estos valores indican que el vapor produjo matrices con sitios de adsorción de alta energía, posiblemente debido a la exposición de grupos hidrófilos sin pérdida significativa de solutos. A diferencia de la ebullición, el vapor transfiere el calor con menor lixiviación, por lo que puede alterar la estructura y conservar componentes capaces de interactuar con el agua. Esta explicación concuerda con las isothermas, en las que el vapor produjo altos valores de  $x_e$  en la col y la coliflor.

La disminución de  $q_{st}$  en vapor fue distinta de la de los otros pretratamientos: el brócoli descendió hasta 0,44 kJ/mol, la coliflor hasta 0,50 kJ/mol y la col hasta 0,56 kJ/mol en los puntos reportados. La disminución pronunciada confirma la existencia de una superficie heterogénea: pocos sitios iniciales muy energéticos, seguidos de zonas de menor afinidad. En matrices vegetales, esta heterogeneidad puede deberse a la coexistencia de celulosa cristalina, hemicelulosa amorfa, pectinas parcialmente solubilizadas, proteínas desnaturalizadas y poros generados durante el secado. El alto  $q_{st}$  inicial del vapor, junto con un alto  $x_e$  en  $a_w$  elevada, sugiere una harina con fuerte interacción inicial con agua y elevada capacidad de retención cuando el ambiente empieza a ganar humedad (Bagirei et al., 2021).

**Figura 19.** Calor isostérico neto de adsorción a diferentes contenidos de humedad en muestras tratadas con vapor.

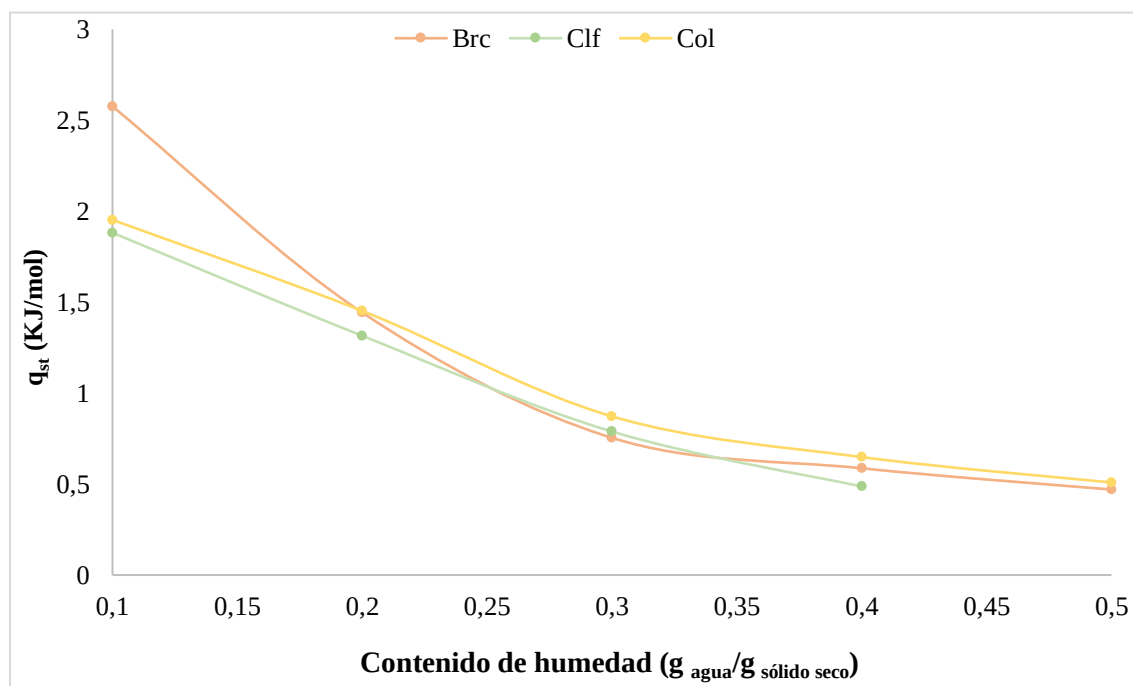


### 3.1.4.5 Tratamiento por microondas

En el pretratamiento por microondas (*Figura 20*), el brócoli presentó un  $q_{st}$  inicial de 2,5766 kJ/mol, la coliflor de 1,8817 kJ/mol y la col de 1,9525 kJ/mol. El microondas produjo valores iniciales intermedios, inferiores a los del vapor en el brócoli y la coliflor, pero comparables o superiores a los del control en ciertas zonas. El calentamiento por microondas genera una transferencia de energía volumétrica y rápida, lo que puede provocar una ruptura celular interna, incluida la formación de microcanales y la redistribución del agua antes del secado. Esto depende de la matriz; dicho daño puede aumentar el área accesible o colapsar estructuras, reduciendo así los sitios de alta energía.

La estabilidad máxima de harinas deshidratadas suele ubicarse cerca de la humedad de lo que se denomina monocapa (Aguirre et al., 2021). Por debajo de ese punto, el producto suele ser muy seco, pero susceptible a la oxidación debido a una mayor exposición de las superficies; por encima, se incrementan la movilidad molecular y la reactividad. En las harinas a partir de residuos de crucíferas, la identificación precisa de  $x_m$  permitiría definir humedades críticas de almacenamiento y ayudar en el diseño de procesos de secado. Sin embargo, a partir de los resultados experimentales se puede concluir que las formas de las isothermas y el descenso de  $q_{st}$  con  $x_e$  respaldan la existencia de una transición del agua fuertemente adsorbida hacia la multicapa.

**Figura 20.** Calor isostérico neto de adsorción a diferentes contenidos de humedad en muestras tratadas con microondas.



### 3.1.4.6 Relación entre $q_{st}$ , monocapa y estabilidad

Los perfiles de  $q_{st}$  evaluados en los resultados permiten derivar zonas de energía equivalentes. La región de valores bajos de  $x_e$  corresponde, conceptualmente, a una monocapa en la que el agua se une a sitios primarios. Müller (2025), señala que en esta región el  $q_{st}$  alcanza su máximo; la zona intermedia corresponde a la formación de una estructura multicapa con  $q_{st}$  decreciente. La zona alta corresponde a un comportamiento del agua más cercano al de la fase líquida, con una energía diferencial menor.

En los modelos GAB, la humedad de monocapa ( $x_m$ ) se interpreta como el contenido de humedad asociado a la cobertura molecular óptima para la estabilidad; esto no refleja una falta de agua, sino un estado en el que el agua se retiene fuertemente y presenta movilidad limitada (Iglesias et al., 2022). La estabilidad máxima de la harina suele situarse cerca del contenido de humedad de la monocapa. Por debajo de este punto, el producto puede estar muy seco pero susceptible a la oxidación debido a la mayor superficie expuesta; por encima de este punto, la movilidad y la reactividad molecular aumentan.

En la harina de residuos de crucíferas, una determinación precisa de  $x_m$  mediante GAB mejoraría el análisis, ya que permitiría determinar el contenido crítico de humedad durante el almacenamiento. Sin embargo, incluso sin incluir estos parámetros provenientes de los resultados experimentales, la forma de las isothermas y la disminución de  $q_{st}$  con el aumento de la concentración de  $x_e$  confirman la transición del agua fuertemente adsorbida al agua multicapa y al agua capilar.

### 3.1.5 Comparativa entre brócoli, coliflor y col

La comparación general muestra que ninguna matriz puede considerarse la más higroscópica en todas las condiciones. La afinidad por el agua depende del tratamiento y de la zona de  $a_w$ . En el control, el brócoli tenía un  $x_e$  alto a una  $a_w$  alta, especialmente a 30 y 40 °C, mientras que la col presentó un  $q_{st}$  inicial alto. En vapor, la col alcanzó los valores más altos de  $x_e$ , especialmente a 20, 30 y 40 °C. La coliflor mostró una alta respuesta al vapor y valores correspondientes en hornos de microondas. Esta variabilidad confirma que la higroscopicidad es una nueva propiedad de la composición, la estructura y el procesamiento.

El brócoli mostró una elevada capacidad de adsorción en las muestras sin pretratamiento (control) y una sensibilidad a los microondas a altas temperaturas. Sus residuos contienen tallos y hojas con fibras, proteínas y compuestos bioactivos que aportan grupos hidrófilos. La ebullición redujo significativamente su  $x_e$ , lo que indica la pérdida de componentes solubles o el colapso de los sitios disponibles. El vapor mostró una mayor afinidad y el microondas presentó un comportamiento moderadamente alto. Desde una perspectiva de composición, la harina de brócoli podría proporcionar una funcionalidad relacionada con la retención de agua, pero sería necesario controlar la humedad ambiental para evitar el apelmazamiento (Torres et al., 2022)

La coliflor presentó una menor capacidad de secado, consistente con su alta humedad inicial, pero sus isothermas mostraron una alta adsorción al tratarse con vapor o a temperaturas más altas. La estructura porosa de la inflorescencia puede facilitar el acceso del vapor de agua, tal como lo menciono en su estudio Dushkova et al. (2023), se encuentran en las zonas internas tras el secado. La ebullición redujo parte de su capacidad, pero no lo eliminó. Tecnológicamente, la harina de coliflor puede ser sensible a las condiciones de almacenamiento húmedas, aunque, a escala económica, debe considerarse su menor capacidad de secado.

Por otra parte, la col mostró el comportamiento más crítico durante el tratamiento con vapor. Sus valores de  $x_e$  fueron más altos en diversas condiciones, y su primer  $q_{st}$  también fue alto en control, ebullición y cocción al vapor. Esto indica que se trata de una matriz con sitios energéticos adecuados y una alta capacidad de retención a alta  $a_w$ . La estructura de la hoja, rica en paredes celulares y en compuestos de pectina, puede explicar esta reacción. Durante el almacenamiento, la harina de col sometida a pretratamiento con vapor mostró ser más susceptible a absorber humedad cuando se expone a un ambiente con alta humedad relativa. Sin embargo, la col pretratada con microondas tuvo un valor final bajo, lo que sugiere que el tratamiento puede mejorar la estabilidad inicial si se acompaña de un embalaje adecuado (Quizhpe et al., 2024).

No se realizó análisis estadístico porque se utilizó el contenido de humedad de equilibrio obtenidas a partir de las isothermas de adsorción construidas en la sección 3.1.3 para calcular el calor isostérico. Si bien se obtuvieron valores promedios y desviaciones estándar para el contenido de humedad de equilibrio, los datos se utilizaron principalmente para construir curvas de adsorción y estimar parámetros termodinámicos derivados, en lugar de para probar hipótesis estadísticas entre tratamientos.

Además, el cálculo del calor isostérico se basó en interpolaciones y en las relaciones lineales de la ecuación de Clausius-Clapeyron a contenidos de humedad constante. En consecuencia, los valores obtenidos representan cantidades termodinámicas estimadas mediante un modelo, en lugar de observaciones experimentales estrictamente independientes. Por lo tanto, el uso del análisis de varianza (ANOVA) puede conducir a una interpretación estadística limitada o no representativa, especialmente considerando que las isothermas reflejan una relación continua entre la actividad del agua, la temperatura y el contenido de humedad. Por consiguiente, la discusión se centró en un análisis comparativo de tendencias, cambios correspondientes y correlaciones fisicoquímicas entre matrices y tratamientos.

### **3.1.6 Implicaciones para almacenamiento, envase y vida útil**

Los resultados permiten definir criterios prácticos de almacenamiento: en primer lugar, la harina no debe exponerse a una humedad relativa elevada, ya que las isothermas muestran un marcado aumento de  $x_e$  a  $a_w$  por encima de 0,6964 y, especialmente, en el rango de 0,8140 a 0,8461. De la misma manera, las muestras tratadas con vapor, especialmente en col y coliflor, requieren una mayor protección contra la humedad debido a su alta capacidad de adsorción. En tercer lugar, la cocción puede reducir la higroscopicidad en ciertas matrices, pero es necesario evaluar su efecto sobre el rendimiento y los compuestos funcionales. En cuarto lugar, para algunas muestras, el microondas puede ser una alternativa equilibrada, pero no elimina la necesidad de un embalaje de barrera.

En el estudio realizado por Chaturvedi & Chakraborty (2024), se menciona que el uso de fundas aluminizadas con cierre hermético es adecuado, ya que limita la transferencia de vapor de agua y la exposición a la luz. Sin embargo, la estabilidad real dependerá de la humedad relativa del ambiente de almacenamiento, de la frecuencia de apertura del contenedor y de la temperatura. Si la harina está destinada a preparaciones alimentarias, su comportamiento higroscópico también afectará la fluidez, la compactación, la capacidad de retención de agua y la textura del producto final. Las harinas con mayor  $x_e$  y  $a_w$  alta pueden ser útiles como ingredientes que retienen agua en productos horneados o productos extruidos, pero son más vulnerables a apelmazarse durante el almacenamiento (Mhamadi, 2022).

Desde la perspectiva de la economía circular, la conversión de residuos crucíferos en harina funcional requiere una estabilización termodinámica. Los residuos frescos poseen un  $a_w$  cercano a 1 y un contenido de humedad superior al 87 %, por lo que son perecederos. El secado reduce

significativamente estos valores, pero la adsorción posterior puede modificar parcialmente la estabilidad si el producto se expone a un ambiente húmedo. Por tanto, las isothermas son herramientas predictivas para diseñar no sólo el proceso de secado, sino también el sistema de envasado y las condiciones de distribución.

## CAPÍTULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se elaboraron harinas a partir de residuos de brócoli, coliflor y col mediante diferentes procesos térmicos, entre ellos: ebullición, vapor y microondas, seguidos de secado por convección a 65 °C durante 8 horas y de una molienda posterior. Los resultados mostraron que los residuos frescos presentaban un alto contenido de humedad inicial (%H) y una alta actividad de agua ( $a_w$ ), con valores de  $a_w$  de 0,97 en brócoli, 0,96 en coliflor y 0,96 en col, y humedades iniciales de 87,08 %, 93,32 % y 96,81 %, respectivamente, lo que confirma su alta susceptibilidad al deterioro. Posterior al secado, todas las muestras disminuyeron considerablemente estos parámetros, lo que demuestra que este proceso, sumado a los pretratamientos aplicados, aumenta la estabilidad de estas frente a sus respectivas muestras de control.
- Se construyeron las isothermas de adsorción de agua de las harinas de brócoli, coliflor y col mediante el método gravimétrico estático, utilizando soluciones salinas saturadas para generar diferentes condiciones de actividad de agua ( $a_w$ ) entre 0,12 y 0,85, así como la humedad relativa específica correspondiente a cada solución salina. Las muestras fueron evaluadas a distintas temperaturas, lo que permitió analizar el comportamiento higroscópico de cada harina en función de la humedad relativa de almacenamiento. Las isothermas obtenidas presentaron un comportamiento característico de tipo III, propio de matrices vegetales ricas en fibra, proteínas y carbohidratos. Además, se evidenció que el contenido de humedad de equilibrio ( $x_e$ ) aumentó a medida que aumentaba la actividad de agua, especialmente en los rangos altos de humedad relativa. Esto demuestra que estas harinas pueden adsorber una mayor cantidad de agua cuando se exponen a ambientes húmedos.
- El calor isostérico neto de adsorción se calculó a partir de isothermas experimentales mediante la ecuación de Clausius–Clapeyron, lo que permitió determinar la energía de interacción entre el agua y la matriz de harinas. Los resultados mostraron que el  $q_{st}$  fue mayor para contenidos de humedad de equilibrio más bajos y disminuyó de forma sucesiva a medida que aumentó  $x_e$ . En el tratamiento por ebullición, la col presentó el mayor  $q_{st}$  inicial (2,94 kJ/mol a  $x_e = 0,1$  g agua/g sólido seco), seguida por la coliflor (2,14 kJ/mol) y el brócoli (2,07 kJ/mol); estos valores disminuyeron a 0,48, 0,53 y 0,43 kJ/mol a  $x_e = 0,6$  g agua/g sólido seco, respectivamente. En el tratamiento con vapor, se registraron los valores máximos iniciales de  $q_{st}$ , siendo la coliflor con 3,95 kJ/mol y el brócoli con 3,87 kJ/mol los más destacados a  $x_e = 0,1$  g agua/g sólido seco. Este fenómeno determina que las primeras moléculas de agua se unen con mayor fuerza a los sitios activos de la matriz, mientras que, a mayores niveles de humedad, predominan interacciones energéticas más débiles, asociadas con agua de multicapa o de capilar.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Las harinas obtenidas se deben almacenar en envases herméticos de alta barrera, como fundas aluminizadas, para evitar la adsorción de la humedad ambiental, en especial en las muestras tratadas por vapor, que presentaron mayor afinidad por el agua.
- Resulta necesario controlar la humedad relativa y la temperatura durante el almacenamiento, ya que las harinas presentan una mayor adsorción de agua a valores de alta actividad de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- A. Aviara, N. (2020). Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products. *Sorption in 2020s*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.87996>
- 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>
- Aguirre, L., Giraldo Giraldo, J. C., Giraldo Giraldo, G. A., & Cortés Rodríguez, M. (2021). Modeling of moisture sorption isotherm and evaluation of net isosteric heat for spray-dried fortified coconut (*Cocos nucifera* L.) powder. *British Food Journal*, 123(7), 2349–2364. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1017>
- Ahmed, M. W., & Islam, M. N. (2018). Moisture Sorption Characteristics of Selected Commercial Flours (Wheat, Rice and Corn) of Bangladesh. *American Journal of Food Science and Technology*, Vol. 6, 2018, Pages 274-279, 6(6), 274–279. <https://doi.org/10.12691/AJFST-6-6-7>
- Alamri, M. S., Mohamed, A. A., Hussain, S., Ibraheem, M. A., & Abdo Qasem, A. A. (2018). Determination of Moisture Sorption Isotherm of Crosslinked Millet Flour and Oxirane Using GAB and BET. *Journal of Chemistry*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2369762>
- Al-Khalili, M., Al-Habsi, N., Rahman, M., Al-Khalili, M., Al-Habsi, N., & Rahman, M. (2023). Moisture sorption isotherms of whole and fractionated date-pits: Measurement and theoretical modelling. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(5), 104678. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2023.104678>
- Alpizar-Reyes, E., Castaño, J., Carrillo-Navas, H., Alvarez-Ramírez, J., Gallardo-Rivera, R., Pérez-Alonso, C., & Guadarrama-Lezama, A. Y. (2018). Thermodynamic sorption analysis and glass transition temperature of faba bean (*Vicia faba* L.) protein. *Journal of Food Science and Technology*, 55(3), 935–943. <https://doi.org/10.1007/S13197-017-3001-1>
- Ambawat, S., Sharma, A., & Saini, R. K. (2022). Mathematical Modeling of Thin Layer Drying Kinetics and Moisture Diffusivity Study of Pretreated Moringa oleifera Leaves Using Fluidized Bed Dryer. *Processes* 2022, Vol. 10, Page 2464, 10(11), 2464. <https://doi.org/10.3390/PR10112464>
- Araújo, A. L. de, & Pena, R. da S. (2020). Effect of particle size and temperature on the hygroscopic behaviour of cassava flour from dry group and storage time estimation. *CyTA - Journal of Food*, 18(1), 178–186. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1717635>

- Arslan-Tontul, S. (2020a). Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. *Heat and Mass Transfer* 2020 57:3, 57(3), 543–550. <https://doi.org/10.1007/S00231-020-02978-8>
- Arslan-Tontul, S. (2020b). Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. *LWT*, 119. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108859>
- Asrate, D. A., & Ali, A. N. (2025). Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. *Applied Food Research*, 5(1), 100927. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2025.100927>
- Aviara, N. A., & Aviara, N. A. (2020). Moisture Sorption Isotherms and Isotherm Model Performance Evaluation for Food and Agricultural Products. *Sorption in 2020s*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.87996>
- Ayala-Aponte, A. (2011). Estimación de las isothermas de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 9(1), 88–96. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1692-35612011000100011&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612011000100011&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Ayoola, A. S., Olatayo Jekayinfa, S., Oluwafemi Idowu, D., Lung'aho, M., Mushoriwa, H., Adesokan, M., Alamu, E. O., Mohan, A., & Saffarionpour, S. (2026). Drying kinetics, energy efficiency, and moisture diffusion characteristics of African walnut (*Tetracarpidium conophorum*) during cabinet and oven drying. *Frontiers in Food Science and Technology*, 6, 1794521. <https://doi.org/10.3389/FRFST.2026.1794521>
- Bagirei, S. Y., Mohammad, Y. S., Maude, M. M., Abdulkadir, F., & Yakub, M. M. (2021). Determination of Functional Properties and Moisture Sorption Isotherm of Dried Bean Flour. *International Journal of Science for Global Sustainability*, 7(2), 1–9. <https://go.gale.com/ps/i.do?p=AONE&sw=w&issn=24889229&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA672257850&sid=googleScholar&linkaccess=fulltext>
- Bamisaye, V. J., Olasebikan, Y. O., & Ajayi, F. E. (2024). Sorption Isotherm and Thermodynamic Properties of High-Quality Cassava Flour. *International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals, SEB4SDG 2024*. <https://doi.org/10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630228>
- Barrial-Lujan, A. I., Camacho, M. del M., García-Martínez, E., Yuste, A., & Martínez-Navarrete, N. (2025). The Particle Size to Modulate the Techno-Functional Properties of Fava Bean Pod Powder. *Powders* 2025, Vol. 4, Page 14, 4(2), 14. <https://doi.org/10.3390/POWDERS4020014>

- 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>
- Bas-Bellver, C., Melero-Carnero, N., López-González, D., Barrera, C., Verdeguer, M., & Seguí, L. (2025). Bio-Products Obtained from Broccoli and Cabbage Wastes Are Proposed as Functional Food Ingredients and Bioherbicides for Sustainable Weed Management. *Sustainability (Switzerland)*, 17(1), 282. <https://doi.org/10.3390/SU17010282/S1>
- Boateng, I. D. (2024). Recent processing of fruits and vegetables using emerging thermal and non-thermal technologies. A critical review of their potentialities and limitations on bioactives, structure, and drying performance. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(13), 4240–4274. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2140121>
- Bongjo, N. B., Ariahu, C. C., & Ikyenge, B. A. (2025). Moisture desorption and thermodynamic characteristics of nixtamalized maize and fermented cassava flour blends. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 75(3), 303–313. <https://doi.org/10.31883/PJFNS/205003>
- Boucheham, N., Galet, L., Patry, S., & Zidoune, M. N. (2019). Physicochemical and hydration properties of different cereal and legume gluten-free powders. *Food Science & Nutrition*, 7(9), 3081. <https://doi.org/10.1002/FSN3.1170>
- Chaturvedi, S., & Chakraborty, S. (2024). Effect of temperature and packaging materials on the shelf-life stability and in vitro properties of microencapsulated and spray-dried synbiotic legume-based instant beverage powder. *Sustainable Food Technology*, 2(1), 162–174. <https://doi.org/10.1039/D3FB00094J>
- Cheng, X., Adhikari, B., Xie, A., Jiang, H., Xu, S., & Jia, Q. (2025). Moisture sorption behaviour and thermodynamic properties of adsorbed water of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) powder. *International Food Research Journal*, 27(3), 505.
- Chigbo, K. S., Linus-Chibuezeh, A., Moufunanya, U. F., Adindu-Linus, C. O., Adepoju, F. O., Eke, A. Ben, & Okechukwu, Q. N. (2024). Mathematical modeling of the effects of thickness and temperature on thin-layer drying kinetics of oven-dried cooking bananas (*Musa* spp., sub. grp. ABB) slices. *Food Production, Processing and Nutrition*, 6(1), 51-. <https://doi.org/10.1186/S43014-024-00233-9/FIGURES/8>
- Ciurzyńska, A., Karwacka, M., Janowicz, M., & Galus, S. (2025). Evaluation of the Influence of Coating and Coating Composition on the Sorption Properties of Freeze-Dried Carrot Bars.

- Cui, T., Wu, X., Mou, T., & Fan, F. (2023). Water usability as a descriptive parameter of thermodynamic properties and water mobility in food solids. *Npj Science of Food* 2023 7:1, 7(1), 30-. <https://doi.org/10.1038/s41538-023-00207-0>
- Dimassi, O. (2026). Water Activity as a Central Determinant of Tahini Quality, Safety, and Shelf Stability. *Journal of Food Science*, 91(1), e70810. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.70810>
- do Carmo, J. R., Corrêa, J. L. G., Cruz, M. de S., Martins, M. J. N., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2025a). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of isomaltulose-enriched mango. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 106(1), 260. <https://doi.org/10.1002/JSFA.70149>
- do Carmo, J. R., Corrêa, J. L. G., Cruz, M. de S., Martins, M. J. N., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2025b). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of isomaltulose-enriched mango. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 106(1), 260. <https://doi.org/10.1002/JSFA.70149>
- do Carmo, J. R., Corrêa, J. L. G., Cruz, M. de S., Martins, M. J. N., Sanches, M. A. R., & Telis-Romero, J. (2026). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of isomaltulose-enriched mango. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 106(1), 260–271. <https://doi.org/10.1002/JSFA.70149;ISSUE:ISSUE:DOI>
- Dubrovskaja, A., Galoburda, R., Kruma, Z., Ozola, L., & Straumite, E. (2026). Valorization of By-Products from White Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) Processing. *Foods*, 15(6), 1009. <https://doi.org/10.3390/FOODS15061009/S1>
- Dushkova, M. A., Simitchiev, A. T., Kalaydzhiev, H. R., Ivanova, P., Menkov, N. D., & Chalova, V. I. (2023). Moisture Sorption Behavior of Deproteinized Sunflower Meal and Patterned Food Extrudate. *Applied Sciences* 2024, Vol. 14, Page 65, 14(1), 65. <https://doi.org/10.3390/APP14010065>
- Essilfie, G. L., Afful, M. A. D., Baddoo, R. N. N., & Kumedzro-Ashiade, R. U. (2026). Effect of drying methods, pretreatment and storage conditions on nutritional quality and consumer acceptability of cocoyam leaves (*Xanthosoma sagittifolium*). *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1657192. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2025.1657192/TEXT>
- Eugui, D., Velasco, P., Abril-Uriás, P., Escobar, C., Gómez-Torres, Ó., Caballero, S., & Poveda, J. (2023). Glucosinolate-extracts from residues of conventional and organic cultivated broccoli

- leaves (*Brassica oleracea* var. *italica*) as potential industrially-scalable efficient biopesticides against fungi, oomycetes and plant parasitic nematodes. *Industrial Crops and Products*, 200, 116841. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.116841>
- Fikry, M., Al-Ghamdi, S., Alfaifi, B., Ibrahim, M. N., Alqahtani, N., Umar, M., & Assatarakul, K. (2025). Mathematical modeling of sorption isotherms and the thermodynamic properties of vacuum-dried and freeze-dried Barhi dates. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 19781-. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01935-x>
- Fogang Mba, A. R., Demasse Mawamba, A., Nolla, N. P., Dongho Dongmo, F. F., Gouado, I., & Kansci, G. (2025a). Moisture adsorption isotherms, thermodynamics properties, and shelf-life estimation of the flour of *Imbrasia epimethea* larvae. *Discover Food* 2025 5:1, 5(1), 310-. <https://doi.org/10.1007/S44187-025-00481-9>
- Fogang Mba, A. R., Demasse Mawamba, A., Nolla, N. P., Dongho Dongmo, F. F., Gouado, I., & Kansci, G. (2025b). Moisture adsorption isotherms, thermodynamics properties, and shelf-life estimation of the flour of *Imbrasia epimethea* larvae. *Discover Food* 2025 5:1, 5(1), 310-. <https://doi.org/10.1007/S44187-025-00481-9>
- Gichau, A. W., Okoth, J. K., & Makokha, A. (2019a). Moisture sorption isotherm and shelf life prediction of complementary food based on amaranth–sorghum grains. *Journal of Food Science and Technology*, 57(3), 962. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-04129-2>
- Gichau, A. W., Okoth, J. K., & Makokha, A. (2019b). Moisture sorption isotherm and shelf life prediction of complementary food based on amaranth–sorghum grains. *Journal of Food Science and Technology*, 57(3), 962. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-04129-2>
- Guo, Q., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Yu, D. (2024). Drying technologies of novel food resources for future foods: Progress, challenges and application prospects. *Food Bioscience*, 60, 104490. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2024.104490>
- Hosseininejad, S., Larrea, V., Quiles, A., Hernando, I., & Moraga, G. (2024). Water activity and glass transition effect on the physical properties and bioactive compounds of persimmon peel powder. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(4), 2487–2494. <https://doi.org/10.1111/IJFS.16982>;SUBPAGE:STRING:FULL
- Iglesias, H. A., Baeza, R., & Chirife, J. (2022). A Survey of Temperature Effects on GAB Monolayer in Foods and Minimum Integral Entropies of Sorption: a Review. *Food and Bioprocess Technology* 2021 15:4, 15(4), 717–733. <https://doi.org/10.1007/S11947-021-02740-W>

- Iji, S. I., Inyang, U. E., & Etuk, B. R. (2025). Models for the Development of Sorption Isotherms: A Review. *American Journal of Food Science and Technology*, Vol. 13, 2025, Pages 27-37, 13(2), 27–37. <https://doi.org/10.12691/AJFST-13-2-2>
- INEC. (2024). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC*.
- Jia, X. X., Li, S., Han, D. P., Chen, R. peng, Yao, Z. Y., Ning, B. an, Gao, Z. X., & Fan, Z. C. (2022). Development and perspectives of rapid detection technology in food and environment. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(17), 4706–4725. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1878101>
- Jin, X., & Van der Sman, R. G. M. (2022). Interaction between large deformation and moisture transport during dehydration of vegetables. *Food Structure*, 32, 100269. <https://doi.org/10.1016/J.FOOSTR.2022.100269>
- Karataş, M., & Arslan, N. (2022). Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of cowpea (*Vigna unguiculate* L. Walp) stored in a chamber under controlled humidity and temperature. *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), e14101. <https://doi.org/10.1111/JFPE.14101>;ISSUE:ISSUE:DOI
- Khaled, L., Ali, N. M., Nader, R., Rolet, N., Sadek, E. S., Farag, M. A., & Shoeib, T. (2025). Valorization of agri-food crucifer vegetables waste for food, functional food and nutraceuticals applications. *Bioresources and Bioprocessing* 2025 12:1, 12(1), 50-. <https://doi.org/10.1186/S40643-025-00895-4>
- Kovačević, D. B., & Putnik, P. (2022). Sustainable Functional Food Processing. *Sustainable Functional Food Processing*, 454. <https://doi.org/10.3390/BOOKS978-3-0365-5302-3>
- Li, J., Wan, F., Huang, X., Yang, X., Zang, Z., Xu, Y., Wu, B., Zhang, K., & Ma, G. (2024). Novel Ultrasonic Pretreatment for Improving Drying Performance and Physicochemical Properties of Licorice Slices During Radio Frequency Vacuum Drying. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 4071, 13(24), 4071. <https://doi.org/10.3390/FOODS13244071>
- Li, Y., Liang, M., Li, J., Jiang, K., Li, X., & Zheng, Z. (2025a). Simulation and Experimental Studies of Heat-Mass Transfer and Stress–Strain in Carrots During Hot Air Drying. *Agriculture* 2025, Vol. 15, Page 484, 15(5), 484. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE15050484>
- Li, Y., Liang, M., Li, J., Jiang, K., Li, X., & Zheng, Z. (2025b). Simulation and Experimental Studies of Heat-Mass Transfer and Stress–Strain in Carrots During Hot Air Drying. *Agriculture* 2025, Vol. 15, Page 484, 15(5), 484. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE15050484>

- López-Hernández, A. A., Ortega-Villarreal, A. S., Vázquez Rodríguez, J. A., López-Cabanillas Lomelí, M., & González-Martínez, B. E. (2022). Application of different cooking methods to improve nutritional quality of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) regarding its compounds content with antioxidant activity. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 28, 100510. <https://doi.org/10.1016/J.IJGFS.2022.100510>
- MAG. (2024). *Boletín situacional de brócoli 2024*. [https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/situacionales-agricolas/situacional-brocoli?utm\\_source=chatgpt.com](https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/situacionales-agricolas/situacional-brocoli?utm_source=chatgpt.com)
- Mago, M., Gupta, R., Yadav, A., & Kumar Garg, V. (2022). Sustainable treatment and nutrient recovery from leafy waste through vermicomposting. *Bioresource Technology*, 347, 126390. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126390>
- Mahalaxmi, S., Himashree, P., Malini, B., & Sunil, C. K. (2022). Effect of microwave treatment on the structural and functional properties of proteins in lentil flour. *Food Chemistry Advances*, 1, 100147. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2022.100147>
- Mansour, N. E., Villagran, E., Rodriguez, J., Akrami, M., Flores-Velazquez, J., Metwally, K. A., Alhumedi, M., Ahmed, A. F., & Elshawadfy Elwakeel, A. (2025). Effect of Drying Conditions on Kinetics, Modeling, and Thermodynamic Behavior of Marjoram Leaves in an IoT-Controlled Vacuum Dryer. *Sustainability* 2025, Vol. 17, Page 5980, 17(13), 5980. <https://doi.org/10.3390/SU17135980>
- Martins-Vieira, J. C., Torres-Mayanga, P. C., & Lachos-Perez, D. (2022). Hydrothermal Processing of Lignocellulosic Biomass: an Overview of Subcritical and Supercritical Water Hydrolysis. *BioEnergy Research* 2022 16:3, 16(3), 1296–1317. <https://doi.org/10.1007/S12155-022-10553-8>
- Mhamadi, M. M. (2022). *Characterization of non-processed and processed dietary fibers*. <https://hdl.handle.net/20.500.11794/136443>
- Müller, R. (2025). Thermodynamics: From Energy and Entropy to Heat Transfer and Phase Transitions. *Thermodynamics: From Energy and Entropy to Heat Transfer and Phase Transitions*, 1–419. <https://doi.org/10.1515/9783110310207>
- Mutlu, C., Mutlu, & Ceren. (2024). Bee bread: sorption isotherms, thermodynamic characteristics of moisture adsorption and evaluation of adsorbed water. *HMT*, 60(10), 1745–1753. <https://doi.org/10.1007/S00231-024-03518-4>

- Noguera, D. F., & Rivero, D. M. (2021). Isotermas dinámicas de sorción de humedad y propiedades termodinámicas de café soluble. *Ingeniería y Región*, ISSN 1657-6985, N°. 25, 2021, Págs. 32-45, (25), 32–45. <https://doi.org/10.25054/22161325.2840>
- Nowak, K., Rohn, S., & Halagarda, M. (2025). Impact of Cooking Techniques on the Dietary Fiber Profile in Selected Cruciferous Vegetables. *Molecules* 2025, Vol. 30, Page 590, 30(3), 590. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES30030590>
- Ocampo, V. P., Hernandez, A. L. Y., Marratte, R., Baena, Y., Gutiérrez-López, G. F., Ambrose, K., & Carvajal, M. T. (2025). Effect of Drying Methods on the Physical and Surface Properties of Blueberry and Strawberry Fruit Powders: A Review. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 13094, 15(24), 13094. <https://doi.org/10.3390/APP152413094>
- Perazzini, H., & Perazzini, M. T. B. (2022). Drying of Agro-Industrial Residues for Biomass Applications. *Handbook of Biomass Valorization for Industrial Applications*, 129–178. <https://doi.org/10.1002/9781119818816.CH7>
- Perez-Pirotto, C., Moraga, G., Hernando, I., Cozzano, S., & Arcia, P. (2022). Sorption Isotherms, Glass Transition and Bioactive Compounds of Ingredients Enriched with Soluble Fibre from Orange Pomace. *Foods*, 11(22), 3615. <https://doi.org/10.3390/FOODS11223615>
- Quizhpe, J., Ayuso, P., Rosell, M. de los Á., Peñalver, R., & Nieto, G. (2024). Brassica oleracea var italica and Their By-Products as Source of Bioactive Compounds and Food Applications in Bakery Products. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 3513, 13(21), 3513. <https://doi.org/10.3390/FOODS13213513>
- Ramírez-Pulido, B., Bas-Bellver, C., Betoret, N., Barrera, C., & Seguí, L. (2021). Valorization of Vegetable Fresh-Processing Residues as Functional Powdered Ingredients. A Review on the Potential Impact of Pretreatments and Drying Methods on Bioactive Compounds and Their Bioaccessibility. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 654313. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2021.654313/XML>
- Risco, D., Gutiérrez, A., Val, J., León, J., Díaz, A., Benalcázar, P., Prieto, H., Risco, D., Gutiérrez, A., Val, J., León, J., Díaz, A., Benalcázar, P., & Prieto, H. (2018). Programación de riego en brócoli (*Brassica oleracea* L. cv. itálica) en los Andes ecuatorianos. *Idesia (Arica)*, 36(1), 57–63. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100057>
- Roos, Y. H. (2024a). Water sorption modeling and monolayer of biological and food materials. *LWT*, 201, 116271. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116271>

- Roos, Y. H. (2024b). Water sorption modeling and monolayer of biological and food materials. *LWT*, 201, 116271. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116271>
- Saini, R., Kaur, S., Aggarwal, P., & Dhiman, A. (2023a). The influence of conventional and novel blanching methods on potato granules, phytochemicals, and thermal properties of colored varieties. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1178797. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2023.1178797/TEXT>
- Saini, R., Kaur, S., Aggarwal, P., & Dhiman, A. (2023b). The influence of conventional and novel blanching methods on potato granules, phytochemicals, and thermal properties of colored varieties. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1178797. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2023.1178797/TEXT>
- Santos, A. A. de L., Leal, G. F., Marques, M. R., Reis, L. C. C., Junqueira, J. R. de J., Macedo, L. L., & Corrêa, J. L. G. (2025a). Emerging Drying Technologies and Their Impact on Bioactive Compounds: A Systematic and Bibliometric Review. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 6653, 15(12), 6653. <https://doi.org/10.3390/APP15126653>
- Santos, A. A. de L., Leal, G. F., Marques, M. R., Reis, L. C. C., Junqueira, J. R. de J., Macedo, L. L., & Corrêa, J. L. G. (2025b). Emerging Drying Technologies and Their Impact on Bioactive Compounds: A Systematic and Bibliometric Review. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 6653, 15(12), 6653. <https://doi.org/10.3390/APP15126653>
- Shinali, T. S., Zhang, Y., Altaf, M., Nsabiyeze, A., Han, Z., Shi, S., & Shang, N. (2024). The Valorization of Wastes and Byproducts from Cruciferous Vegetables: A Review on the Potential Utilization of Cabbage, Cauliflower, and Broccoli Byproducts. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 1163, 13(8), 1163. <https://doi.org/10.3390/FOODS13081163>
- Silva, J., Paiva, M., Pavanello, A., Mantovan, J., & Mali, S. (2022). Fiber-rich ingredients obtained from agroindustrial residues through combined hydrothermal-chemical processes. *Food Chemistry Advances*, 1, 100149. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2022.100149>
- Silva, K. S., Polachini, T. C., Luna-Flores, M., Luna-Solano, G., Resende, O., & Telis-Romero, J. (2021). Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. *Journal of Food Process Engineering*, 44(9), e13784. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13784;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Siqueira-de-Lima, M., Cagnin, C., Borges-Machado, A. L., Ribeiro-Sanches, M. A., Telis-Romero, J., & Resende, O. (2024). Thermodynamic approach on water vapor sorption of Curcuma longa L. flour. *LWT*, 206, 116592. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2024.116592>

- Sun, Z., Deng, L., Dai, T., Chen, M., Liang, R., Liu, W., Liu, C., & Chen, J. (2023a). Steam blanching strengthened far-infrared drying of broccoli: Effects on drying kinetics, microstructure, moisture migration, and quality attributes. *Scientia Horticulturae*, 317, 112040. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2023.112040>
- Sun, Z., Deng, L., Dai, T., Chen, M., Liang, R., Liu, W., Liu, C., & Chen, J. (2023b). Steam blanching strengthened far-infrared drying of broccoli: Effects on drying kinetics, microstructure, moisture migration, and quality attributes. *Scientia Horticulturae*, 317, 112040. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2023.112040>
- Tavares, L., Sousa, L. R., Magalhães da Silva, S., Lima, P. S., & Oliveira, J. M. (2023). Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamic Properties of Biodegradable Polymers for Application in Food Packaging Industry. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 1634, 15(7), 1634. <https://doi.org/10.3390/POLYM15071634>
- Torres, S. S., López, L. G. R., Lagunas, L. L. M., Bernal, L. G. B., & Ramirez, J. R. (2022). Physicochemical Characterization of Mesquite Flour (*Prosopis laevigata*), Particle Size Distribution, Morphology, Isosteric Heat, and Rheology. *Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.105902>
- Uddin, S., Iqbal, J., Abbasi, B. A., Tareen, A. R., Ijaz, S., Ullah, Z., Yaseen, T., Ali, H., Jamil, M., Sher, H., Ullah, Z., Ali, A., & Mahmood, T. (2025). Bioactive Phytochemicals from Cabbage (*Brassica oleracea*) By-products. *Bioactive Phytochemicals in By-Products from Leaf, Stem, Root and Tuber Vegetables*, 31–57. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-80700-8\\_3/SAVE-RESEARCH](https://doi.org/10.1007/978-3-031-80700-8_3/SAVE-RESEARCH)
- Ueda, J. M., Morales, P., Fernández-Ruiz, V., Ferreira, A., Barros, L., Caroch, M., & Heleno, S. A. (2023). Powdered Foods: Structure, Processing, and Challenges: A Review. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 12496, 13(22), 12496. <https://doi.org/10.3390/APP132212496>
- Villaño, D., Fernández-Pan, I., Arozarena, Í., Ibañez, F. C., Vírveda, P., & Beriain, M. J. (2023). Revalorisation of broccoli crop surpluses and field residues: novel ingredients for food industry uses. *European Food Research and Technology*, 249(12), 3227–3237. <https://doi.org/10.1007/S00217-023-04362-2/FIGURES/2>
- Yadav, S., & Mishra, S. (2023). Moisture sorption isotherms and storage study of spray-dried probiotic finger millet milk powder. *Journal of Stored Products Research*, 102, 102128. <https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2023.102128>

- Zhao, Y., Zhang, W., Yang, H., Xu, Z., Wang, X., Zhang, Z., & Deng, J. (2025a). Effects of drying methods on phytochemicals and antioxidant activity of broccoli by-products. *Food Research International*, 208, 116284. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.116284>
- Zhao, Y., Zhang, W., Yang, H., Xu, Z., Wang, X., Zhang, Z., & Deng, J. (2025b). Effects of drying methods on phytochemicals and antioxidant activity of broccoli by-products. *Food Research International*, 208, 116284. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.116284>