UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: Modelado de la cinética de secado e isoterma de adsorción de agua de mesocarpio de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) sometido a diferentes tratamientos previos al secado

---

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

Autora: Arlett Estefanía Toaquiza Landeta

Tutora: Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato - Ecuador

Febrero - 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

CERTIFICA:

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

Ambato, 16 de enero de 2025.



Mg. Liliana Patricia Acurio Arcos

1804067088

TUTORA

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Arlett Estefanía Toaquiza Landeta, 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 Ingeniera en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Arlett Estefanía Toaquiza Landeta

0504348715

AUTORA

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 este, 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.



Arlett Estefanía Toaquiza Landeta

0504348715

AUTORA

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:

Firmado electrónicamente por:
MANUEL ISRAEL
GUANOQUIZA RIVERA

Presidente del Tribunal

Firmado electrónicamente por:
RODNY DAVID
PEÑAFIEL AYALA

Dr. Rodny David Peñafiel Ayala
C.I. 1712283520

Firmado electrónicamente por:
DANIEL ALFONSO
CABRERA VALLE

Mg. Daniel Alfonso Cabrera Valle
C.I.1802561595

Ambato, 31 de enero de 2025

DEDICATORIA

A Dios por enseñarme que la vida puede ser un completo mar de emociones sobre las cuales se debe aprender a nadar y que siempre se puede estar mejor si se tiene confianza en uno mismo y en él.

A mis padres por darme la oportunidad de ser el fruto de su cosecha, por demostrarme que no hay mejor compañía que la de un padre y no hay mejor recompensa que volver siempre a casa.

A mi pequeña hermana Johanna, por ser la alegría de mi vida en los momentos difíciles, por demostrarme que la vida siempre continua si se tiene un motivo por el cual seguir adelante.

A mis amigos David y Liz por llenarme el corazón de amor que solo se encuentra en un hermano, por escuchar, entender y crear un nuevo hogar.

A mí, por demostrarme que la fuerza que se necesita para seguir adelante solo depende de uno mismo, por ser fuerte y valiente frente a los problemas, por darme la oportunidad de sentirme viva en cada paso.

Arlett

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Técnica de Ambato y a la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, por permitirse ser parte de su gran familia en búsqueda de los sueños propuestos, por ser parte de mi formación académica y personal.

A la Ing. Mg. Liliana Acurio por ser parte de una parte de este gran sueño que se materializa, por ser la guía para terminar esta etapa.

Al Dr. Freddy del Pozo por compartir su conocimiento científico y sus herramientas de trabajo que permitieron el desarrollo de este proyecto de titulación.

A mis seres queridos, familia y amigos, por no dejar de confiar en mí, por darme su alma, corazón y vida, y recordarme que una mano extendida te permite regresar al curso correcto.

Un día dura tres otoños.

Arlett

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 científico-técnica 1

1.1.2.1. Materia prima (*Cucurbita máxima* Duchesne) 1

1.1.2.1.1. Valor nutricional del zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) 2

1.1.2.1.2. Influencia de pretratamientos sobre la materia prima 2

1.1.2.1.3. Pretratamientos aplicados a la materia prima 3

a) Cocción en agua en ebullición 3

b) Cocción a vapor 3

c) Cocción a microondas 3

1.1.2.2. Secado 3

1.1.2.2.1. Parámetros de secado 4

1.1.2.2.2. Efecto sobre la materia prima 4

a) Efecto de la temperatura 4

b) Humedad relativa 4

c) Velocidad del aire 5

1.1.2.2.3. Cinética de secado 5

1.1.2.3. Isotermas de adsorción 6

1.1.2.3.1. Uso de sales saturadas y su influencia sobre la a_w 6
1.1.2.3.2. Cálculo de la humedad de equilibrio 6
1.1.2.3.3. Modelado matemático de las isotermas de adsorción 6
a) Modelado matemático BET 6
b) Modelado matemático GAB 6
1.1.2.3.4. Efecto de los pretratamientos sobre el modelado matemático 7
1.1.2.4. Importancia del modelado matemático 7
1.2. Objetivos 7
1.2.1. Objetivo General 7
1.2.2. Objetivos Específicos 7
CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA 9
2.1. Materiales 9
2.2. Métodos 10
2.2.1. Recolección de materia prima y pretratamientos 10
2.2.2. Secado 10
2.2.3. Determinación de la humedad 11
2.2.4. Modelado matemático de las curvas de cinética de secado 11
2.2.5. Determinación del coeficiente de difusión efectivo del agua 11
2.2.6. Construcción de isotermas de adsorción de agua 12
2.2.7. Cálculo de la humedad de equilibrio 13
2.2.8. Modelado matemático de las isotermas de adsorción 13
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 14
3.1. Humedad y actividad de agua del zapallo pretratado, antes y después del secado 14
3.2. Curvas de cinética de secado 15
3.3. Curvas de velocidad de secado 19
3.4. Modelos matemáticos de las curvas de secado 23
3.5. Modelado matemático de las isotermas de adsorción 32
CAPÍTULO IV-. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 37
4.1. Conclusiones 37
4.2. Recomendaciones 37
MATERIALES DE REFERENCIA 39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recursos materiales 9
Tabla 2. Modelos matemáticos para la cinética de secado 11
Tabla 3. Parámetros para análisis estadístico 12
Tabla 4. Sales utilizadas como factor higroscópico 12
Tabla 5. Modelos matemáticos para isotermas de adsorción de agua 13
Tabla 6. Humedad y actividad de agua de las muestras de zapallo pretratadas, antes y después del secado 14
Tabla 7. Tasas de pérdida de humedad 19
Tabla 8. Difusividad efectiva (D_{eff}) de las muestras de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) 24
Tabla 9. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de la muestra control. 25
Tabla 10. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de la muestra pretratada con agua en ebullición. 27
Tabla 11. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de la muestra pretratada con vapor. 29
Tabla 12. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación, error medio estimado y porcentaje de desvío medio relativo, con los datos obtenidos de cinética de secado de la muestra pretratada con microondas. 31
Tabla 13. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de la muestra control. 34
Tabla 14. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición. 34
Tabla 15. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor. 35
Tabla 16. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas. 36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de secado 5
Figura 2. Curvas experimentales de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne.) de la muestra control y las muestras sometidas a diferentes pretratamientos. 15
Figura 3. Curva experimental de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) de la muestra control 16
Figura 4. Curva experimental de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición. 16
Figura 5. Curva experimental de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor. 17
Figura 6. Curva experimental de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas. 18
Figura 7. Curva de velocidad de secado de la muestra control de zapallo (*Cucurbita máxim*a Duchesne) 20
Figura 8. Curva de velocidad de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición. 21
Figura 9. Curva de velocidad de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor. 22
Figura 10. Curva de velocidad de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas. 23
Figura 11. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de la muestra control. 26
Figura 12. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición. 28
Figura 13. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor. 30
Figura 14. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas. 32
Figura 15. Curvas experimentales de isotermas de adsorción de agua de la muestra control, y las muestras pretratadas con agua en ebullición, vapor y microondas 33

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajado estudió el comportamiento de zapallo tras ser sometido a agua en ebullición, vapor y microondas como pretratamientos, con un posterior proceso de secado a 65 grados centígrados por 8 horas. Las muestras alcanzaron una humedad final en porcentaje del 2,1 en el control, 1,8 para la muestra pretratada con agua en ebullición, 3,2 para vapor y 2,6 para microondas. La cinética de secado se ajustó a diferentes modelos matemáticos (Newton, Page, Page modificado, Henderson & Pabis, Logarítmico y Wang & Singh), siendo el de Page el que presentó un mejor ajuste. Las isotermas de adsorción fueron creadas mediante la aplicación de sales sobresaturadas permitiendo simular ambientes con humedades relativas en porcentaje entre el 11,78 y 80,12. Los valores de humedad en equilibrio alcanzados por las muestras se ajustaron a los modelos BET y GAB. Se observó que el modelo de GAB presentó un mejor ajuste para las muestras control, agua en ebullición y microondas, mientras que el modelo matemático BET permitió explicar el comportamiento de la muestra de zapallo pretratada con vapor. La muestra pretratada con microondas presentó una mayor capacidad de adsorción de agua en la monocapa con un valor de 0,0558 gramos de agua por gramo de sólido seco. Finalmente, las muestras que superaron una humedad relativa del 30 por ciento, mostraron un incremento sustancial en la capacidad de adsorción de agua de las harinas, por lo que se recomiendan condiciones de almacenamiento que no superen un 60 por ciento de humedad relativa.

Palabras clave: Secado de alimentos, isotermas de adsorción, zapallo, modelos matemáticos, humedad de equilibrio.

ABSTRACT

This work studied the behavior of pumpkin being subjected to boiling, steam and microwave as pretreatments, with a subsequent drying process at 65 degrees Celsius for 8 hours. The samples reached a final humidity of 2.1 percent for the control, 1.8 percent for the sample pretreated with boiling water, 3.2 percent for steam and 2.6 percent for microwaves. The drying kinetics were adjusted to different mathematical models (Newton, Page, modified Page, Henderson & Pabis, Logarithmic, and Wang & Singh), being the Page model the one that presented a better fit. Adsorption isotherms were created by applying supersaturated salts that allowed simulating environments with relative humidities between 11.78 percent and 80.12 percent. The equilibrium humidity values reached by the samples were adjusted to the BET and GAB models. It was observed that the GAB model presented a better fit for the control, subjected to boiling water and microwaves. In contrast, the BET mathematical model allowed explaining the behavior of the pumpkin sample pretreated with steam. The sample pretreated with microwaves presented a higher water adsorption capacity in the monolayer with a value of 0.0558 grams of water per gram of dry solid. Finally, the samples exceeded a relative humidity of 30 percent, they showed a substantial increase in the flours' water adsorption capacity, so storage conditions that should not exceed 60percent relative humidity.

Keywords: Food drying, adsorption isotherms, pumpkin, mathematical models, equilibrium humidity.

CAPÍTULO I.- MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

1.1.1. Justificación

El tiempo de vida útil de los productos es una de las mayores preocupaciones de los fabricantes de alimentos, puesto que éstos poseen una gran actividad de agua. Esta agua disponible permite el desarrollo de microorganismos, por lo que la reducción de la humedad por medio de operaciones unitarias como el secado, es indispensable. Esta operación requiere el conocimiento de las condiciones que afectan al proceso, como la temperatura, la velocidad y la humedad. Así mismo, puesto que se da la reducción de la actividad de agua, los productos secos tienden a ser altamente higroscópicos, ya que tienden a absorber la humedad relativa del medio de almacenamiento **(Talens, 2019).**

El zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) es una de las hortalizas que se consume desde la antigüedad en Ecuador, especialmente en la zona central. Se comercializa principalmente en fresco y es altamente perecedero, lo que dificulta su almacenamiento. Es así como el proceso de secado permitiría extender el tiempo de vida útil, brindando una opción innovadora y con potencial de incorporación a productos compuestos en forma de harina, como por ejemplo en premezclas, panes, galletas, entre otros **(Escobar et al., 2012)**. La harina del zapallo presenta un contenido alto de azúcares y de provitaminas A y β-caroteno **(Nurdjanah et al., 2023)**; es decir, permitiría elaborar alimentos funcionales.

Por otro lado, modelar la cinética de secado e isotermas de adsorción del mesocarpio de zapallo permitiría comprender el comportamiento de la materia frente a esta operación unitaria, considerando los fenómenos observables de transferencia de masa y energía, tal y como menciona **Guzmán & Zapata, (2018)**. Este modelamiento puede además proporcionar información sobre los mejores parámetros de ejecución del proceso y las mejores condiciones de almacenamiento para la materia procesada. Es decir, además de brindar información que contribuye al conocimiento técnico, se permite estimar el mejor tratamiento de producción aplicada al zapallo, considerando el posible efecto provocado sobre el producto final tras la aplicación de los pretratamientos **(Choque et al., 2018)**.

1.1.2. Fundamentación científico-técnica

1.1.2.1. Materia prima (*Cucurbita máxima* Duchesne)

El zapallo es una de las frutas cultivadas en los valles andinos desde la antigüedad, su conservación puede resultar de interés en las industrias alimentarias para aumentar la posibilidad de consumo, tomando en cuenta de que se trata de un producto con una humedad que puede variar entre el 90-95 % y una actividad de agua (a_w) que varía entre 0,95-0,99 en estado fresco **(Maldonado, 2017)**.

La cantidad de agua libre disponible en este es alta y con ello la susceptibilidad al crecimiento de microorganismos como levaduras, hongos e incluso bacterias patógenas es considerablemente mayor.

1.1.2.1.1. Valor nutricional del zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne)

Así mismo su consumo aporta varias ventajas nutricionales, como el mejoramiento del sistema inmune y la reducción de la probabilidad de presentar enfermedades degenerativas, debido a la presencia de β - carotenos que, según **Rodríguez et al., (2018),** permite la reducción de los radicales libres, así como también posee compuestos como la provitamina A y una alta cantidad de antioxidantes como los carotenoides y la vitamina C. Dentro de su composición molecular se encuentra una gran cantidad de fibra dietética que permite la regulación del tránsito intestinal lo que permite mejorar la salud digestiva. Además, posee una cantidad considerable de compuestos bioactivos que previenen enfermedades **(Nurdjanah et al., 2023)**.

Así también en lo que respecta a la composición de macromoléculas, la cantidad de carbohidratos en el mesocarpio del zapallo suele ser de hasta 7 %, compuestos por 3 % de azúcares, por lo que presenta un ligero sabor dulce. Además, posee 1 % de proteína y 0,1 % de grasas saludables como el omega - 3 y el omega - 6 **(Maldonado, 2017).**

1.1.2.1.2. Influencia de pretratamientos sobre la materia prima

Dada la cantidad de azúcares, la generación de reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático son muy probables, debido a la exposición de los azúcares reductores al calor o por la liberación de la enzima polifenol oxidasa tras el corte del producto y su exposición directa al oxígeno **(Jadán Piedra, 2017)**. Así también por el contenido de almidón, es claro que se debe buscar el aumento de la digestibilidad, lo que a la vez puede beneficiar al perfil del sabor.
Para prevenir los cambios antes descritos, la aplicación de pretratamientos antes del secado es necesaria **(Tigreros et al., 2021)**; estos procesos permiten inactivar las enzimas e incluso modificar al almidón volviéndolo más digerible. Este efecto se debe a cambios en la estructura molecular del alimento destruyendo la estructura cristalina del almidón y volviéndolo más amorfo, lo que permite que las enzimas digestivas, como la amilasa, puedan descomponerlo en azúcares simples.

Adicionalmente la complementación entre el calor y el agua produce que el almidón se gelatinice, ya que la aplicación de la temperatura a valores que pueden estar comprendidos entre los 60 °C a los 80 °C, permite el ingreso de moléculas de agua en el interior, causando su hinchamiento y su separación. Esto además aumenta la descomposición del almidón en sus azúcares más simples por medio de las enzimas y permite mejorar la digestión en lo que se refiere a su masticabilidad. Sin embargo, al aplicar calor es claro que se debe evitar dañar la calidad nutricional de la materia vegetal **(Pineda et al., 2010)**.

1.1.2.1.3. Pretratamientos aplicados a la materia prima

Los compuestos del zapallo como la provitamina A y los β-carotenos son altamente termosensibles debido a su estructura química, pues poseen una gran cantidad de dobles enlaces que son susceptibles a sufrir cambios debido a su ruptura por efecto del calor, pero a la vez pueden llegar a sufrir reacciones de oxidación que generan descomposición, por ello, la aplicación de pretratamientos influye de diferentes formas sobre la materia prima.

a) Cocción en agua en ebullición

En la cocción en agua en ebullición se dan procesos de conducción y convección como mecanismos de transferencia de calor (**Lee et al., 2017)**, lo que indica que el calor ingresa progresivamente desde el exterior hasta el interior, causado modificaciones moleculares en determinadas partes del alimento.

b) Cocción a vapor

La cocción a vapor como pretratamiento permite que tras los procesos de conducción y convección de calor se dé la inactivación de las enzimas y el ablandamiento de los tejidos vegetales; esto debilitan las paredes celulares y facilita la extracción del agua en el secado, manteniéndose especialmente las vitaminas hidrosolubles, pues este proceso evita que se dé la inmersión de la materia vegetal en el agua. Además de que se conoce que el contacto del vapor con el producto es uniforme, mejorando la consistencia de la textura para su ingreso al proceso de secado (**Andersson et al., 2022)**.

c) Cocción a microondas

La aplicación de las microondas tal y como lo indica **Fernández et al., (2008)**, permite conservar una mayor cantidad de macromoléculas, vitaminas y minerales, debido a que estas penetran en las moléculas de los alimentos, aumentando su energía desde el interior debido a la agitación de las moléculas de agua dentro de alimentos, generando energía que se transforma en calor y que se reparte uniformemente a lo largo del producto. Es decir, el calentamiento será uniforme en todo el interior según las dimensiones de la materia vegetal, lo que evita que se den puntos calientes y fríos que pueden afectar a la composición nutricional del producto, considerando que para su aplicación incluso se genera una rotación del producto para que las microondas se repartan homogéneamente **(Marine & Delgado, 2017; Narváez & León, 2018)**.

1.1.2.2. Secado

Inicialmente, es claro mencionar que la conservación de los alimentos permite principalmente prevenir la contaminación microbiana y con ello su deterioro, que puede afectar la composición nutricional de los productos y su calidad **(Cardona, 2019)**. En el caso del secado es una operación unitaria utilizada a fin de reducir la actividad de agua de los alimentos para extender el tiempo de vida útil **(Sablani, 2006).**

Así mismo, este proceso permite mejorar la calidad sensorial de los productos y su digestibilidad dentro del organismo humano. Sin embargo, las condiciones de almacenamiento de estos productos deben garantizar que no se dé la adsorción de humedad del ambiente, causando la rehidratación y con ello nuevamente el aumento de la actividad de agua, lo que incrementa la susceptibilidad a la contaminación microbiológica **(Rodiles, 2020).**

1.1.2.2.1. Parámetros de secado

En el secado los parámetros que deben ser considerados son la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de secado, éstos influyen directamente sobre el proceso, ya que modifican los fenómenos de transferencia de masa y calor **(Torres, 2019)**.

1.1.2.2.2. Efecto sobre la materia prima

La variación de las condiciones del secado puede influir de forma diferente sobre la materia prima. A continuación, se detallan algunos aspectos a considerar.

a) Efecto de la temperatura

La elevación de la temperatura del aire de secado genera un gradiente de humedad entre el aire y el producto, lo que permite reducir la cantidad de agua del alimento con mayor rapidez. Sin embargo, esta elevación de temperatura no siempre favorece la mayor remoción de agua del producto (**Hashmi, 2008**). A la vez puede influir negativamente sobre la composición nutricional de los alimentos, ya que internamente las moléculas que componen la materia de secado pueden llegar a sufrir degradaciones como la desnaturalización de proteínas, descomposición de carbohidratos, la destrucción de vitaminas, etc. Además, puede repercutir sobre el perfil sensorial del producto, por la generación de compuestos químicos que afectan principalmente al color, olor y sabor, como es el caso de la carbonización y las reacciones de Maillard. En el primer caso la descomposición en carbono de los materiales orgánicos presentes en la materia da lugar a compuestos como carbón, hidrocarburos aromáticos policíclicos, ácidos y fenoles que le brindan olores desagradables y sabores amargos. Mientras que, en el caso de las reacciones de Maillard, la formación de compuestos como las melanoidinas, por el exceso de las altas temperaturas, generan además de los efectos ya mencionados, la coloración oscura de la materia, siendo en conjunto un problema en las características del producto final **(Igartúa & Sceni, 2023)**.

b) Humedad relativa

Así mismo, la humedad relativa del aire de secado influye en la capacidad que tendrá este para absorber el vapor de agua que se expulsa del alimento **(Krokida et al., 2003)**. **López Mejía et al., (2022)**, mencionan que, a mayor humedad relativa del aire, la probabilidad de saturación aumenta impidiendo eliminar el vapor de agua**.**

c) Velocidad del aire

La velocidad del aire influye en la rapidez de extracción del agua del alimento, debido a que el aire caliente que circula entra en contacto con la superficie del alimento y con ello permite que el agua inicie con un proceso de evaporación y se retire de la materia constantemente reduciendo la humedad del producto desde la superficie hacia el centro. Por ello, cuando el flujo de aire aumenta y se vuelve más rápido, éste es capaz de retirar el agua rápidamente por el aumento de la velocidad de la evaporación porque se ve el incremento de la transferencia de calor en el alimento **(Castro et al., 2013)**.

1.1.2.2.3. Cinética de secado

Las curvas de secado son la que expresan la cinética de secado, que corresponde a la pérdida de agua en el tiempo. Esto permite estudiar el comportamiento del fenómeno influido por las condiciones del proceso. En la Figura 1. Curvas de secado se presentan dos curvas de secado que se pueden obtener tras el pesado iterativo de las muestras, la Figura 1a corresponde a la curva que relaciona el tiempo con la humedad y la Figura 1b corresponde a la curva que relaciona la humedad libre con la velocidad de secado. Para ambos casos se identifican zonas atribuidas al secado, siendo el intervalo de la curva A-B aquel correspondiente a la fase inicial en donde empieza el calentamiento y el retiro del agua libre más superficial de la materia vegetal. El intervalo B-C es un periodo contante, en donde el agua de actividad intermedia (agua que no está completamente libre ni completamente ligada) se retira homogéneamente en el alimento. En el intervalo C-D se ve el decremento de la velocidad de secado. Finalmente, en el intervalo D-E el retiro del agua del producto es muy reducido, alcanzando una humedad de equilibrio ya que la proporción de agua ligada en el medio es mayor que la de agua libre, es decir, ya no se puede retirar.

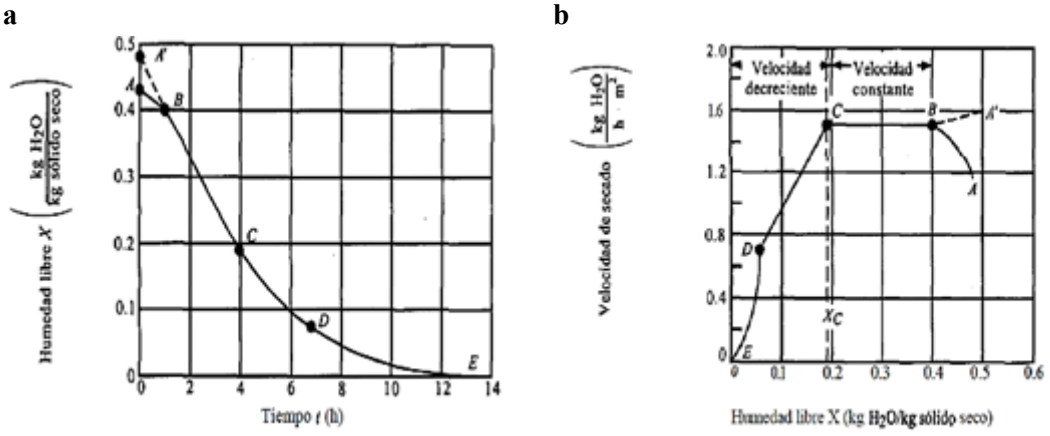


Figura 1. Curvas de secado

Nota. a: Curva de cinética de secado en el tiempo; b: Curva de velocidad de secado en función a la humedad libre. **Fuente:** (Geankoplis, 2006)

1.1.2.3. Isotermas de adsorción

Su análisis se realiza con la finalidad de conocer las condiciones de almacenamiento de los productos (humedad óptima) y así aumentar su estabilidad. Para comprender las isotermas de sorción se han desarrollado modelos matemáticos que explican el comportamiento de los datos experimentales **(López-Mejía et al., 2019).** En bibliografía se reportan modelos teóricos, semi empíricos y empíricos.

La importancia del modelaje de las isotermas de adsorción y de las cinéticas secado recae en la importancia del almacenamiento correcto de los productos, la estimación del efecto de diferentes condiciones de almacenamiento, la producción del tiempo de vida útil de los productos y el posible efecto frente a la combinación industrial de varios alimentos secos **(Escobar et al., 2012)**.

1.1.2.3.1. Uso de sales saturadas y su influencia sobre la a_w

El uso de sales sobresaturadas se debe a que cuando son colocadas dentro de frascos herméticamente cerrados permiten generar un microambiente en donde la actividad de agua determinada por la sal usada se mantiene constante permitiendo evaluar la capacidad de adsorción de agua de las harinas a diferentes actividades agua por efecto de la humedad **(Chirife & Iglesias, 1978).**

1.1.2.3.2. Cálculo de la humedad de equilibrio

La determinación de la humedad de equilibrio refiere al contenido de agua presente en la materia vegetal una vez que ha alcanzado el estado de equilibrio con el ambiente, lo que permite calcular la capacidad de adsorción del material, siendo este punto el que permite en realidad conocer las condiciones óptimas de almacenamiento y conservación de la harina para la inhibición microbiológica **(Gálvez et al., 2006).**

1.1.2.3.3. Modelado matemático de las isotermas de adsorción

a) Modelado matemático BET

El modelo BET propuesto por los autores Brunauer, Emmett y Teller, explica la adsorción de humedad en la monocapa de los alimentos. Este modelo indica que existe un punto de mayor estabilidad a una determinada humedad para los alimentos que han pasado por un proceso de secado. Sin embargo, su aplicación se limita a un rango de actividad de agua de 0 a 0,55 y expresa la adsorción de gases sobre elementos sólidos a temperaturas bajas, pero bajo la posibilidad de formación seguida de múltiples capas de adsorción **(Vega et al., 2006).**

b) Modelado matemático GAB

El modelo GAB desarrollado por los autores Guggenheim, Anderson y de Boer, explica la adsorción de humedad por medio de multicapas desde el inicio de la adsorción. Es decir, se establece que el proceso de adsorción ocurre en varias capas de la superficie y permite su aplicación para alimentos cuya

actividad de agua va de 0 a 0,95. Expresa la adsorción de agua de sólidos higroscópicos como las harinas **(Aedo, 2020).**

1.1.2.3.4. Efecto de los pretratamientos sobre el modelado matemático

La aplicación de pretratamientos puede llegar a generar cambios estructurales en la materia vegetal por su afección a las células vegetales, generando que puedan convertirse en materiales más porosos que permiten aumentar la capacidad de adsorción de agua y con ello la modificación de la isoterma de adsorción. Así también modificaciones en las moléculas pueden aumentar sitios disponibles para la adsorción; por ejemplo, la desnaturalización de las proteínas **(Hyväluoma et al., 2018)**. La modificación de la actividad de agua inicial de la materia puede afectar a la humedad de equilibrio influyendo sobre las isotermas debido al comportamiento de la harina, ya sea que ésta aumente o disminuya (**Fernández et al., 2008**).

1.1.2.4. Importancia del modelado matemático

Tomando en cuenta de que la aplicación de calor influye sobre la composición molecular de los productos, las cinéticas de secado que se obtienen a partir de la toma de datos cuantitativos correspondientes al peso durante el tiempo de secado **(Apaza Mamani, Victor, 2018**); estas permiten conocer el comportamiento del calor sobre la materia y el efecto de las variaciones generadas por los pretratamientos.

Adicionalmente la cinética de secado permite estudiar la forma en la que la materia vegetal pierde humedad por efecto de la evaporación del agua. El modelado matemático es hasta la actualidad en una herramienta que permite mejorar la eficiencia energética de los procesos y la reducción de costos y tiempo **(Karam et al., 2016).**

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- Modelar la cinética de secado e isoterma de adsorción de agua del mesocarpio del zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) sometido a diferentes tratamientos previo al secado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Construir curvas de cinética de secado del mesocarpio del zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) sometido a diferentes tratamientos previos al secado.

- Correlacionar las curvas experimentales de la cinética de secado con modelos matemáticos referenciales.

- Correlacionar los datos de las isotermas de adsorción de agua de la harina del mesocarpio del zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) con modelos matemáticos referenciales.

CAPÍTULO II.- METODOLOGÍA

2.1. Materiales

El presente trabajo de titulación se realizó experimentalmente en los laboratorios de investigación UODIDE de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología, de la Universidad Técnica de Ambato. En la Tabla 1 se enlistan los materiales, reactivos y equipos utilizados.

Tabla 1. Recursos materiales

Material	Cantidad
Computador	1
Impresora	1
Material Vegetal	
Zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne)	Según requerimiento
Material de laboratorio	
Espátula	1
Vasos de precipitación	4
Bandejas	4
Papel aluminio	1
Mortero (150 ml)	1
Varilla de agitación	1
Matraz (250 ml)	4
Cuchillo	1
Placas Petri	10
Papel absorbente	1
Frascos herméticos (250 ml)	10
Balón de aforo	4
Equipos	
Estufa	1
Balanza analítica	1
Deshidratador	1
Microondas	1
Reactivos	
Agua destilada	1 galón
Alcohol al 70%	1 galón
Acetato de potasio	100 g
Bromuro de sodio	100 g
Cloruro de magnesio	100 g
Cloruro de litio	100 g
Sulfato de amonio	100 g
Ácido propiónico	100 g

Elaborado por: Toaquiza (2025)

2.2. Métodos

2.2.1. Recolección de materia prima y pretratamientos

La materia prima utilizada se obtuvo de los mercados locales de la cuidad de Ambato y Latacunga, buscando que la misma se encuentre en un estado óptimo de madurez. Tras su selección se realizó la evaluación de las características organolépticas (color, textura, aroma) y físicas (ausencia de magulladuras), para su posterior lavado exterior mediante el uso de agua corriente fría aplicando las técnicas de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM). La materia prima lavada se peló para extraer la cáscara y se cortó en láminas de aproximadamente 2 mm de espesor, las mismas que fueron organizadas en cuatro grupos homogéneamente para la aplicación de los diferentes pretratamientos.

- **Control**

La materia prima cortada se colocó directamente sobre las bandejas de secado, sirviendo como muestra control.

- **Cocción directa**

Se sometió a cocción bajo la metodología reportada por **Andersson et al., (2022),** a temperatura de ebullición por 5 minutos.

- **Cocción con vapor**

Se sometió a cocción con vapor a temperatura de ebullición por 5 minutos, siguiendo la metodología reportada por **Andersson et al., (2022).**

- **Cocción por microondas**

Las muestras se expusieron a microondas siguiendo la metodología de **Melendre, (2014)**. Se utilizó un microondas de uso doméstico aplicándose una potencia de 750 W por 2,5 minutos.

2.2.2. Secado

Las láminas resultantes de los pretratamientos fueron secadas en un deshidratador cuyo modo de transferencia de calor fue por convección. Se sometieron a 65 °C por 8 horas siguiendo la metodología reportada por **Acurio et al. (2024).** Durante el proceso de secado se tomaron muestras de la materia para evaluar la humedad por diferencia de peso. Para dicho proceso las muestras fueron tomadas en intervalos de 10 minutos durante las dos primeras horas de secado y transcurrido este tiempo se tomaron muestras cada 30 minutos, hasta que se completó el tiempo de secado (8 horas).

2.2.3. Determinación de la humedad

La humedad se determinó mediante el método 984.25 de la **AOAC, (2023)**. Para el cálculo se utilizó la Ecuación 1.

$$\%\mathrm{H} = \frac{\mathrm{P_1} - \mathrm{P_2}}{\mathrm{P_m}} \times 100 \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

En donde:

P_1 = Peso cápsula con muestra sin secar (g)

P_2 = Peso cápsula con muestra seca (g)

P_m = Peso muestra (g)

2.2.4. Modelado matemático de las curvas de cinética de secado

Los valores obtenidos en la cinética de secado se ajustaron a las Ecuaciones de la 2 a la 7, correspondientes a los modelos matemáticos reportados en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelos matemáticos para la cinética de secado

Modelo matemático	Ecuación	
Newton	$MR = Exp\,(-kt)$	**Ecuación 2**
Page	$MR = Exp\,(-kt^n)$	**Ecuación 3**
Page modificado	$MR = Exp\,(-kt)^n$	**Ecuación 4**
Henderson & Pabis	$MR = a \times Exp\,(-kt)$	**Ecuación 5**
Logarítmico	$MR = a \times Exp\,(-kt) + c$	**Ecuación 6**
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	**Ecuación 7**

Nota. MR = ratio de humedad; t = tiempo en horas; n = constante (número entero positivo); *a*, *b*, *c*, *k* = constantes de secado. **Fuente:** Acurio et al., (2023).

2.2.5. Determinación del coeficiente de difusión efectivo del agua

Se determinó el coeficiente de difusión efectivo del agua por medio de la segunda ley de la difusión establecida por Fick para la configuración de una lámina finita (Ecuación 8) **(Crank, 1975; Live, 2013; Corzo et al., 2011).**

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff}}{4 \times L^2} \times t\right) \qquad \textbf{Ecuación 8}$$

En donde:

MR = Ratio de humedad

n = Constante (número entero positivo)

Para evaluar la bondad de los modelos matemáticos se utilizaron las Ecuaciones 9, 10 y 11 (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros para análisis estadístico

Parámetro	Ecuación		Criterio evaluado
Coeficiente de determinación	$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=0}^{n}(X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=0}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}$	**Ecuación 9**	$R^2 \approx 1$
Raíz del error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n}(X_i - Y_i)^2\right)}$	**Ecuación 10**	$RMSE \approx 0$
Error absoluto medio	$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert Y_i - \bar{Y}\rvert$	**Ecuación 11**	$MAE \approx 0$

Nota. Donde n: número de observaciones, X_i: valor experimental, Y_i: valor previsto, $\bar{X}$: valor medio experimental y $\bar{Y}$: valor medio previsto. **Fuente:** Torres et al. (2012).

2.2.6. Construcción de isotermas de adsorción de agua

Se empleó el método gravimétrico estático propuesto por **Spiess & Wolf (1987)** y **Wolf et al. (1985).** Se colocaron aproximadamente 2 g de muestra secada molida en cajas Petri abiertas al ambiente. Las cajas se colocaron en recipientes herméticos con humedad relativa controlada por medio de sales sobresaturadas (Tabla 4). Se controló la variación de peso con una balanza de alta precisión (±0,0001 g) durante dos meses, hasta alcanzar el equilibrio (variación de máximo ± 0,0005 g). En las cámaras con sales cuya actividad de agua proporcionada fue superior a 0.7, se añadieron gotas de ácido propiónico para evitar el crecimiento fúngico.

Tabla 4. Sales utilizadas como factor higroscópico

Nomenclatura	Sal	a_w
LiCl	Cloruro de litio	0,1178
CH_3CO_2K	Acetato de potasio	0,2982
$MgCl_2$	Cloruro de magnesio	0,3425
NaBr	Bromuro de sodio	0,5732
$(NH_4)_2SO_4$	Sulfato de amonio	0,8012

Nota. **Fuente:** Acurio et al. (2023).

2.2.7. Cálculo de la humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio se calculó mediante la Ecuación 12.

$$x_{e(b.s)} = \frac{P_0 \times x_0 + \Delta P}{P_0(1 - x_0)} \qquad \textbf{Ecuación 12}$$

En donde:

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

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

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

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

2.2.8. Modelado matemático de las isotermas de adsorción

El modelado de los datos tomados se llevó a cabo bajo la metodología propuesta por **Chirife & Iglesias (1978)**. Los valores de humedad en equilibrio se ajustaron a las Ecuaciones 13 y 14 correspondientes a los modelos matemáticos reportados en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelos matemáticos para isotermas de adsorción de agua

Modelo matemático	Ecuación	
Brunauer, Emmett y Teller (BET)	$X_e = \frac{X_0 \times c \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 + (c - 1) \times a_w)}$	**Ecuación 13**
Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB)	$X_e = \frac{X_0 \times c \times k \times a_w}{(1 - (k \times a_w) \times (1 + (c - 1) \times (k \times a_w))}$	**Ecuación 14**

Nota. X_e= contenido de humedad de equilibrio; X_0= contenido de humedad de la monocapa; c= constante empírica adimensional para las ecuaciones BET y GAB; k= segunda constaste empírica adimensional para la ecuación GAB. **Fuente:** Acurio et al. (2023).

Para evaluar la bondad de los modelos matemáticos utilizados se utilizaron las ecuaciones mostradas en la Tabla 3.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Humedad y actividad de agua del zapallo pretratado, antes y después del secado

En la Tabla 6 se presenta el contenido de humedad y actividad de agua de las láminas de zapallo pretratadas antes y después del proceso de secado. Se puede evidenciar que existe una variación en el contenido de humedad inicial de las muestras debido a los cambios que sufren las láminas durante los pretratamientos; tendencia que se repite para los datos de actividad de agua del producto **(Dimitrovski, 2022)**. Se nota que tratar las láminas con agua en ebullición y vapor, hidrata las muestras, aumentando su humedad y actividad de agua.

Mientras que las muestras pretratadas con microondas alcanzaron una menor humedad y actividad de agua final (1,76±0,02% y 0,2581±0,006, respectivamente) debido a daños estructurales que sufren las muestras al ser sometidas a este tratamiento térmico, que suele ser considerado más agresivo en comparación con el vapor. Es decir, estas muestras poseen una menor cantidad de agua disponible para reacciones de deterioro de tipo químicas o enzimáticas **(Tiebe et al., 2018)**.

En el estudio realizado por **Umuhozariho et al. (2020)**, se presentan datos similares para la variedad *Cucurbita máxima*, cuyo contenido de humedad inicial presentó un rango de humedad de 82,10% - 91,9%, mientras que las muestras secadas por medio de la aplicación de aire caliente a una temperatura de 65°C por un tiempo de 8 horas, presentó humedades de 2,7% - 4,6%.

Tabla 6. Humedad y actividad de agua de las muestras de zapallo pretratadas, antes y después del secado

Muestra	Humedad (%)		Actividad de agua (a_w)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Control	87,00 (0,004) ^{c}	2,06 (0,02) ^{c}	0,9877 (0,002) ^{ab}	0,2981 (0,002) ^{b}
Agua en ebullición	91,03 (0,002) ^{b}	2,64 (0,06) ^{b}	0,9961 (0,001) ^{a}	0,3309 (0,002) ^{a}
Vapor	91,89 (0,001) ^{a}	3,20 (0,04) ^{a}	0,9897 (0,006) ^{a}	0,3314 (0,002) ^{a}
Microondas	83,90 (0,001) ^{d}	1,76 (0,02) ^{d}	0,9807 (0,002) ^{b}	0,2581 (0,006) ^{c}

Diferentes letras en columnas representan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre pretratamientos.

3.2. Curvas de cinética de secado

En la Figura 2 se muestran las curvas de cinética de secado correspondiente a las cuatro muestras, demostrando el claro descenso de humedad en función del tiempo de secado. Se evidencia que las muestras tratadas con vapor y agua en ebullición parten con valores de humedad inicial superiores; sin embargo, la muestra sometida a agua en ebullición a la hora de tratamiento empieza a presentar valores de humedad inferiores a la muestra control. De acuerdo con la tendencia observada, se puede identificar que la muestra sometida a vapor requerirá más tiempo para eliminar el agua del producto; mientras que la muestra sometida a microondas alcanza valores de humedad inferiores al resto de muestras, en todo el intervalo de tiempo evaluado.

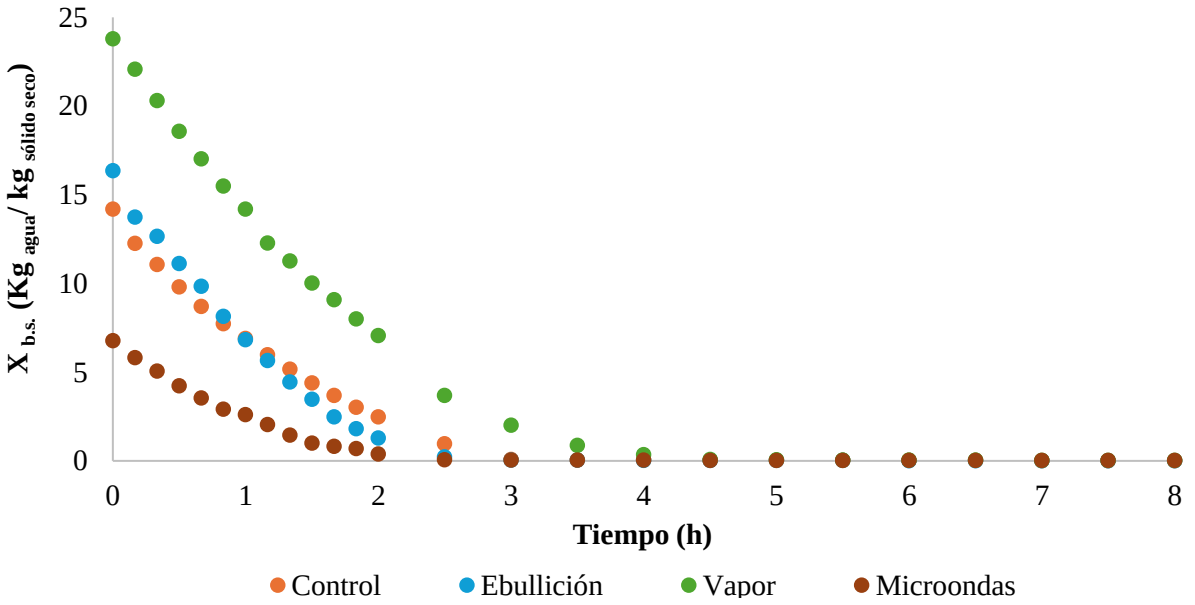


Figura 2. Curvas experimentales de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne.) de la muestra control y de las muestras sometidas a diferentes pretratamientos.

Por otra parte, se analizaron las etapas del secado dividiéndolas en dos zonas de acuerdo con las tendencias de decremento. La primera etapa (A-B) corresponde al cambio de humedad de la muestra desde el inicio del proceso, hasta que empieza a mostrar una disminución de humedad más reducida. Y una segunda etapa (B-C) que evalúa la reducción de humedad en su etapa más constante.

La Figura 3 presenta la pérdida de humedad de la muestra control. Se observa una mayor pendiente en la etapa de secado A-B hasta el punto de inflexión B, en donde se ve una disminución de la tasa de pérdida de humedad. Es decir, a partir de dicho punto la remoción de agua del producto tiende a ser más lenta debido a que se ha retirado la mayor cantidad de agua libre **(Cardona, 2020). Potosí-Calvache et al., (2017),** reportaron el punto B a los 180 minutos en un estudio de secado de *Cucurbita moschata.*

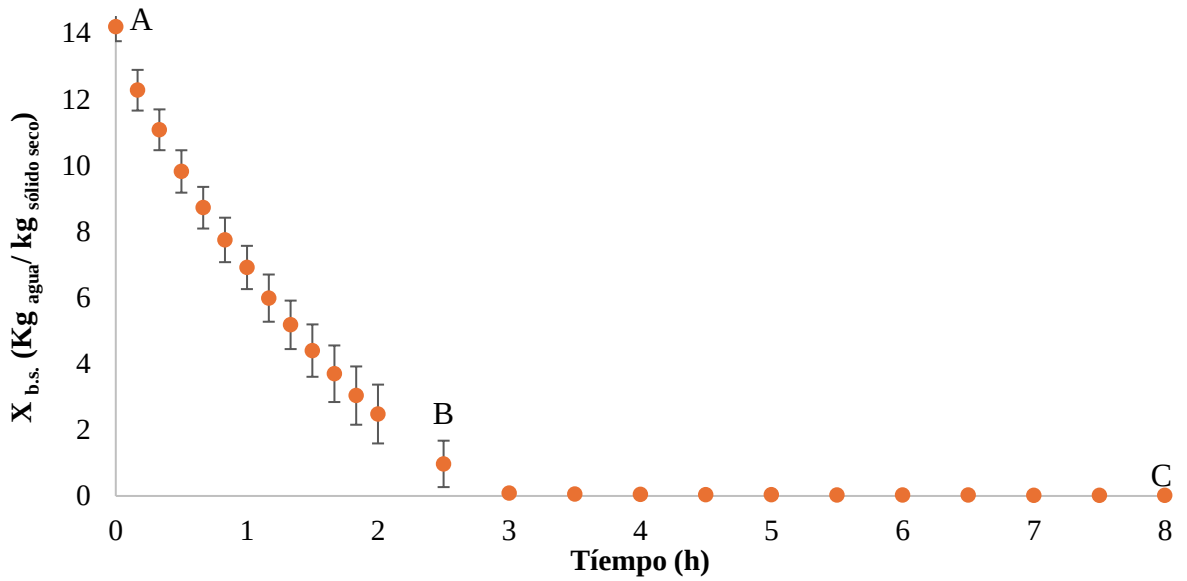


Figura 3. Curva de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) de la muestra control.

En la Figura 4 se presenta la curva de secado de la muestra pretratada con agua en ebullición, en donde, al igual que en la muestra control, la mayor parte del agua es removida en la etapa de secado A-B. A pesar de que la cantidad inicial de agua en la materia vegetal es mayor que en la muestra control, el tiempo requerido para reducir la humedad es menor. El aumento de la tasa de pérdida de humedad se debe a que por efecto de la temperatura se genera una lisis de las membranas celulares o cambios moleculares que causan su relajación, debido a la desnaturalización de las proteínas principalmente, generando cambios en la permeabilidad de la célula y con ello el ingreso y liberación de agua contenida en su interior tiende a facilitarse **(Lima et al., 2013).** Además, durante el pretratamiento se produce una hidratación del almidón, ya que por efecto del calor esta molécula se relaja permitiendo el paso del agua entre espacios intermoleculares y su interacción con grupos hidroxilo **(Ratnayake & Jackson, 2007).**

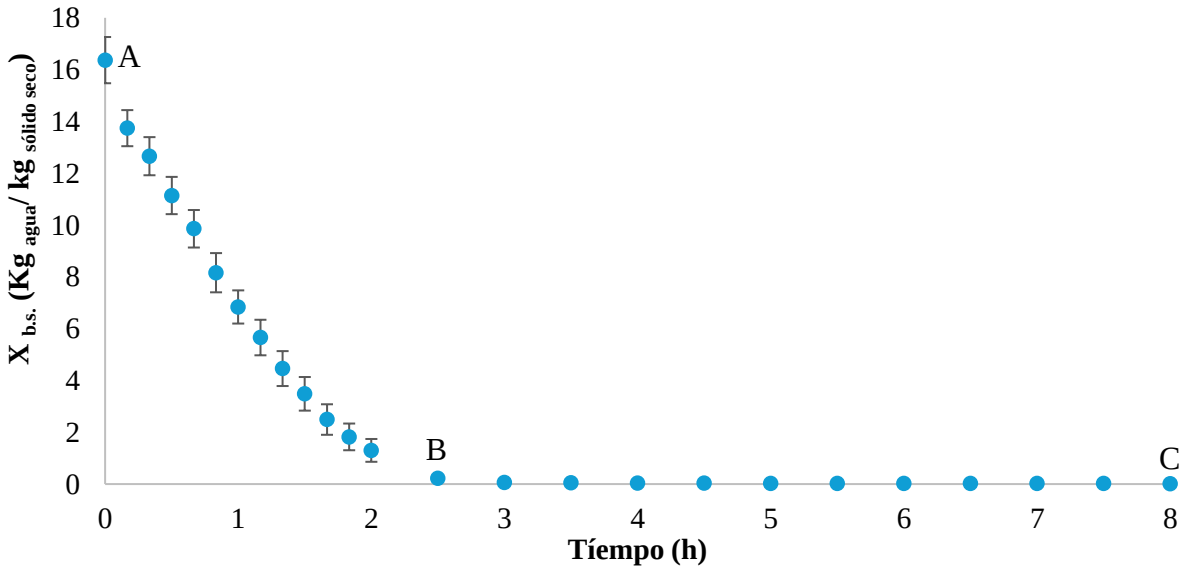


Figura 4. Curva de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición.

En la Figura 5 correspondiente a la muestra de zapallo pretratada con vapor se observa que el contenido de agua al inicio del proceso de secado supera el valor observado en el control y con ello el punto de inflexión B se presenta tras 3 horas de secado. Para este caso, al igual que en el pretratamiento con agua en ebullición, se ve la incorporación de partículas de agua a la materia vegetal, estimando que en la cocción a vapor ocurre en mayor grado de hidratación, debido a que el vapor que se encuentra sobre la superficie del alimento tiende a condensarse e ingresar hacia el producto **(Andersson et al., 2022).** Dado este efecto, la humedad inicial de la materia vegetal incrementa. Este efecto fue reportado por **Elshrif & Salah, (2023)**, quienes evidenciaron un aumento de la humedad del brócoli de 88,82% a 89,04% después de un proceso de pretratamiento similar.

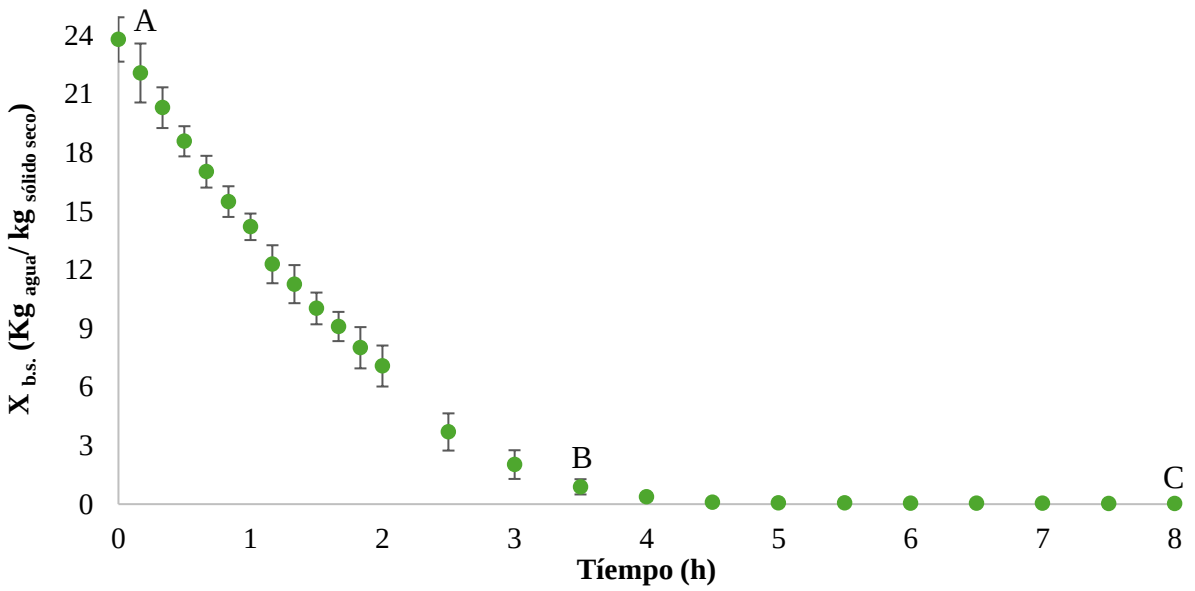


Figura 5. Curva de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor.

En la Figura 6 se presenta la curva de pérdida de humedad frente al tiempo de la muestra pretratada con microondas, en donde a diferencia de las otras muestras tratadas térmicamente, el contenido de agua al inicio del secado es incluso menor que en la muestra control, (6,7851 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$). Esto mantiene relación con el tiempo estimado para finalizar el secado, pues se requiere retirar menor cantidad de agua del producto para alcanzar la humedad final establecida en normativa (15,5% en base húmeda establecida por el Codex en harina de trigo) **(Codex, 2025).**

La reducción del contenido de humedad al inicio del secado se debe a que tras aplicar microondas uniformemente alrededor de toda la superficie de la muestra, el agua se evapora de forma rápida ya que las moléculas de agua absorben la energía transmitida por las microondas, aumentando su energía cinética y la velocidad de movimiento, y con ello su rápida evaporación **(Alibas, 2007)**.

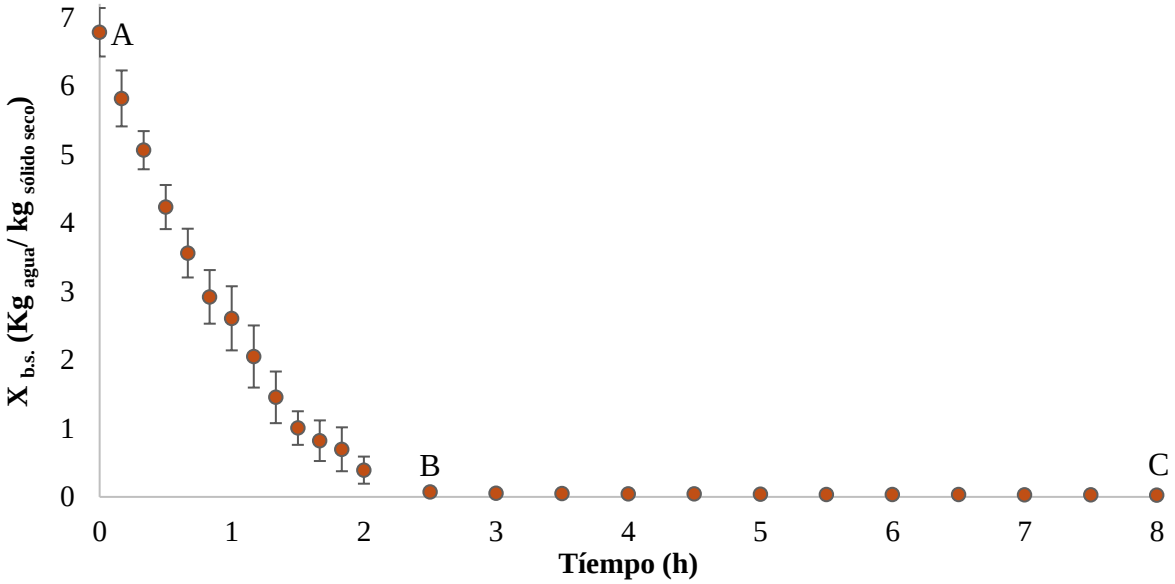


Figura 6. Curva de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas.

Adicionalmente, de acuerdo con las barras de desviación estándar observadas en las Figuras de la 3 a la 6, se observa que la dispersión de los datos es baja, indicando el adecuado proceso, considerando que las variaciones pueden atribuirse a las dimensiones de las muestras debido a la forma de la materia prima utilizada.

En la Tabla 7 se presentan los valores de las tasas de pérdida de humedad en las etapas de secado previamente mencionadas (A-B y B-C). Se puede corroborar que las muestras pretratadas con agua en ebullición y vapor presentan una mayor tasa de pérdida de humedad en la etapa A-B, frente a la muestra control. Este comportamiento puede deberse a que con estos pretratamientos las paredes celulares se ablandan y se aumenta la permeabilidad, lo que facilita la liberación de agua **(Silveira, 2017)**. **Rodríguez (2020),** menciona que la aplicación de altas temperaturas ocasiona que en el interior de las células el agua libre se convierta en vapor, incrementando la presión interna de vapor, lo que facilita la salida de la humedad por espacios intercelulares generados por la expansión de las paredes celulares.

Según la normativa **INEN, (2013)** para evitar la contaminación microbiológica y asegurar la calidad de las harinas el contenido de humedad mínima debe ser de 15% (0,177 $kg_{agua}/kg_{sólido\ seco}$); con este dato se puede estimar que las muestras pretratadas con agua en ebullición y microondas son aquellas en donde el tiempo de secado es menor, siendo la segunda mencionada aquella que requiere menor tiempo. Este análisis permite optimizar los recursos invertidos para el proceso. Un caso similar se reportó en el estudio realizado por **Alibas, (2007)**, sobre rodajas de *Cucurbita máxima* en donde la combinación de microondas y aire caliente redujo el tiempo óptimo de secado a un aproximado de 1 hora.

Así también, la muestra pretratada con vapor, a pesar de poseer mayores tasas de pérdida de humedad en las etapas A-B y B-C, requieren un mayor tiempo para alcanzar la humedad final adecuada para su conservación (4,34 horas). Esto se debe a que la humedad inicial del producto es mayor; es decir, la cantidad de agua presente en el producto que se requiere retirar es mayor frente al resto de muestras.

Tabla 7. Tasas de pérdida de humedad

Muestra	Tasa de pérdida de humedad (A-B) $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido\ seco} \times h}\right]$	Tasa de pérdida de humedad (B-C) $\left[\frac{kg_{agua}}{kg_{sólido\ seco} \times h}\right]$	Tiempo de secado óptimo [h] al alcanzar 0,177 $kg_{agua}/kg_{sólido\ seco}$
Control	5,2338	0,0799	2,95
Agua en ebullición	7,4807	0,0987	2,64
Vapor	7,4903	0,2627	4,34
Microondas	3,1555	0,0064	2,33

3.3. Curvas de velocidad de secado

En lo que respecta a las curvas de velocidad de secado, según **Chen & Murray Douglas, (1999)**, presentan diferentes fases al relacionar la velocidad de secado frente a la humedad libre. Es así como en la Figura 7 se muestra la tendencia correspondiente a la muestra control, observando cuatro etapas diferentes. Se inicia con la etapa de adaptación (A-B), en donde se observa un aumento de la temperatura de la materia vegetal tal y como lo menciona **Geankoplis, (2006).** Esta etapa está marcada por un leve incremento de la velocidad de secado y con ello una reducción de la humedad de 4,38 $kg_{agua}/kg_{sólido\ seco}$, con una duración de aproximadamente 0,5 horas.

Seguidamente se presenta la etapa B-C, que corresponde a un periodo de secado en donde la velocidad tiende a ser constante. En este caso la velocidad alcanzó un valor de 1,35±0,23 $kg_{agua}/(kg_{sólido\ seco} \times h \times m^2)$, una reducción de la humedad de 4,38 $kg_{agua}/kg_{sólido\ seco}$ y esta etapa tuvo una duración de 1,33 horas. En el punto C se evidencia la humedad crítica, que corresponde al punto en el cual la caída de la velocidad de secado tiende a disminuir de forma significativa, con un valor de 5,1767 $kg_{agua}/kg_{sólido\ seco}$. Según **Tecante, (2009)**, la disminución de la velocidad a partir del punto C se debe a que la cantidad de agua libre (cuya remoción es rápida) empieza a ser menor, lo que indica que queda a disposición agua ligada que es de difícil remoción. Posteriormente se observa la etapa C-D, que es una fase de velocidad se secado decreciente y finalmente el periodo D-E en donde se ve una rápida caída de la velocidad de secado.

Por otro lado, de la gráfica se puede evidencia que el punto E corresponde a la humedad de equilibrio (0,0210 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$), ya que las variaciones de velocidad y de humedad en el producto son muy pequeñas, debido a que la humedad del ambiente está en equilibrio con la humedad del producto; es decir, ya no ocurren los procesos de absorción-desorción del agua **(Tecante, 2009).**

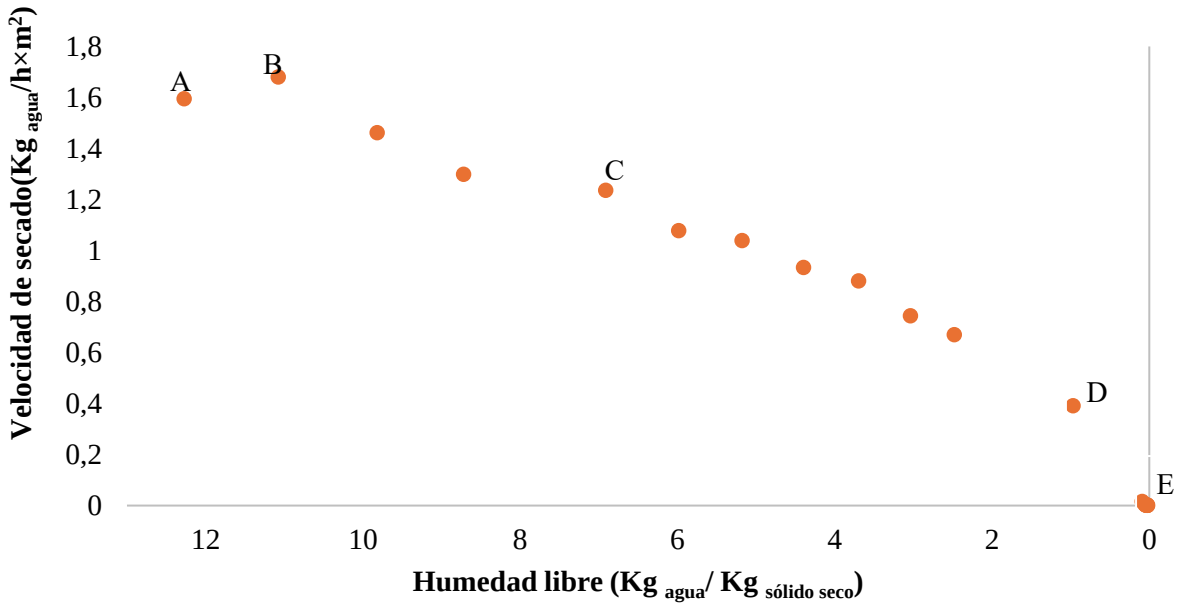


Figura 7. Curva de velocidad de secado de la muestra control de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne)

En lo que respecta a la curva de velocidad de secado de la muestra pretratada con agua en ebullición (Figura 8), se puede evidenciar que la etapa A-B genera una pérdida de 5,2273 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$, en un tiempo de 0,3333 horas. Es decir, la velocidad de secado es mayor en esta etapa en relación con la muestra control, manteniendo relación con lo mencionado en el apartado de curvas de secado referente a la modificación de la pared celular y la facilidad de remoción de agua del producto **(Akpinar et al., 2003).** Así también, como en el caso anterior, la etapa B-C corresponde a una etapa en donde la velocidad es constante (1,1991±0,1918 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$×h×m^2), y en esta muestra culmina en el punto C, correspondiente a la humedad crítica con un valor de 4,4593 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$ en un tiempo de 1,33 horas.

En la etapa C-D la diminución de la velocidad es evidente, explicado por la dificultad de remoción de agua del producto a medida que avanza el tiempo. En esta etapa se redujo 4,24 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$, hasta finalizar el tiempo de secado con una humedad de equilibrio de 0,018 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco.}$ Este valor es el menor reportado entre las cuatro muestras analizadas; es decir, en total el periodo de decrecimiento para el presente caso dura aproximadamente 6,67 horas, incluida la etapa D-E en donde se ve la pérdida de 0,2066 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$.

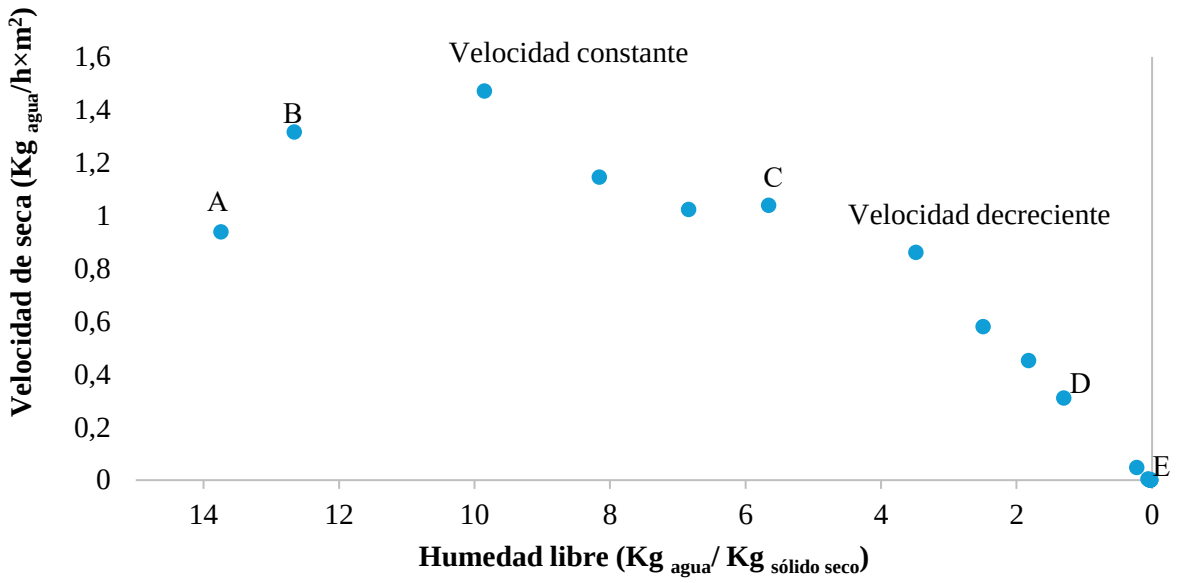


Figura 8. Curva de velocidad de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición.

En la Figura 9 se observa el comportamiento de la muestra pretratada con vapor. De forma general se puede ver que posee menor incremento de velocidad en la fase de adaptación; es decir esta muestra presenta mayor dificultad para alcanzar las condiciones de temperatura a la cual se ejecuta el secado **(Geankoplis, 2006)**. Sin embargo, generó una reducción de 3,50 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$.

La etapa B-C trascurrió por un tiempo de 1,5 horas con una velocidad constante de 1,15±0,20 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$× h× m^2, hasta que la muestra alcanzó una humedad crítica de 8,01 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$. En esta etapa, a diferencia de las anteriores, permitió la reducción de la humedad de 12,2968 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$; es decir, el retiro de agua de la muestra fue mayor frente al resto de muestras. Así también se observó la etapa C-D con una pérdida de 5,99 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$ y la etapa D-E con una reducción de humedad de 1,99 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$, hasta que alcanzó la humedad de equilibrio con un valor de 0,033 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$.

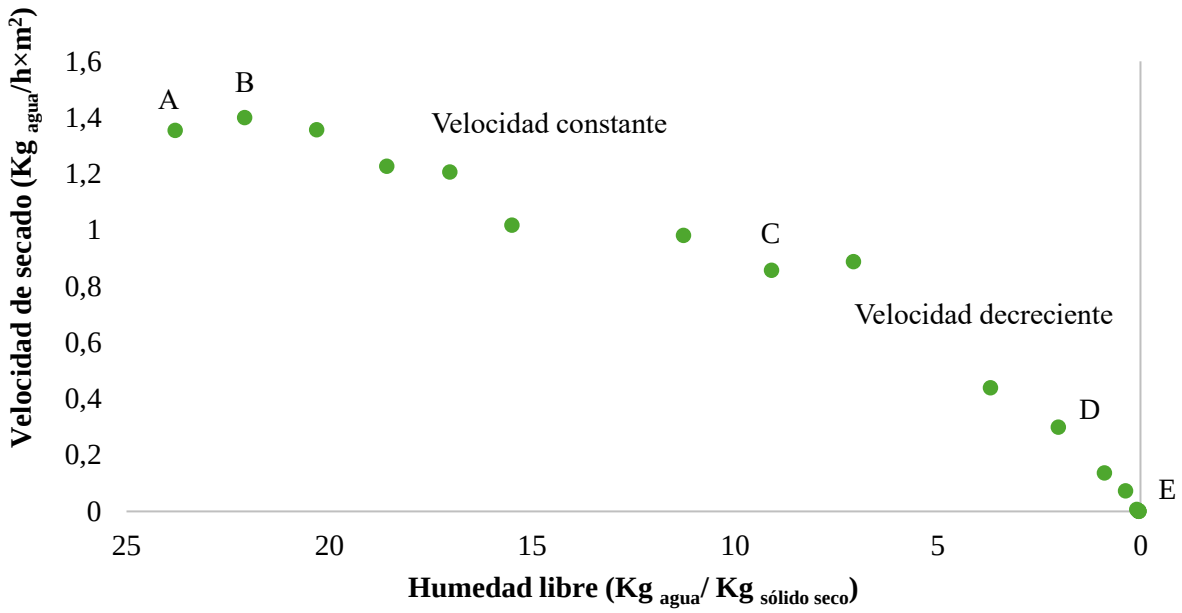


Figura 9. Curva de velocidad de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor.

Finalmente, en lo que respecta a la curva de velocidad de secado de la muestra pretratada con microondas (Figura 10), se puede decir que inicialmente se produjo una reducción de la humedad del producto de 2,5526 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$, con una duración de tan solo 0,5 horas. Seguidamente se observó la etapa B-C, en donde la velocidad permaneció contante (1,92±0,29 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$× h× m^2) por aproximadamente 0,83 horas; es decir, la velocidad con la que se removió el agua en esta muestra fue mayor frente al resto de muestras pretratadas, permitiendo la reducción de la humedad de 2,7788 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$. A partir del punto C, en donde se muestra la humedad crítica (1,45 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$) se observó la disminución de la velocidad de secado hasta el punto D, en donde se notó la pérdida de la humedad hasta alcanzar una humedad de 0,3637 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$, en la etapa final D-E.

Para este caso la humedad de equilibro alcanzada correspondió a 0,027 kg $_{agua}$/kg $_{sólido\ seco}$. **Maldonado & Pacheco, (2003),** reportó que el aumento de la temperatura en la materia vegetal genera cambios en la humedad de equilibrio obtenida provocado por cambios celulares, es por ello que para muestras de brócoli se observó una reducción de 6,49% hasta 4,3%.

Según **Khraisheh et al., (2000),** la duración de las etapas depende de factores como las condiciones de secado, al igual que las condiciones iniciales del producto; por ello, los pretratamientos influyen sobre la estructura de las moléculas de la materia vegetal y con ello sobre los fenómenos de transporte de masa y calor que influyen sobre la velocidad de secado en el tiempo.

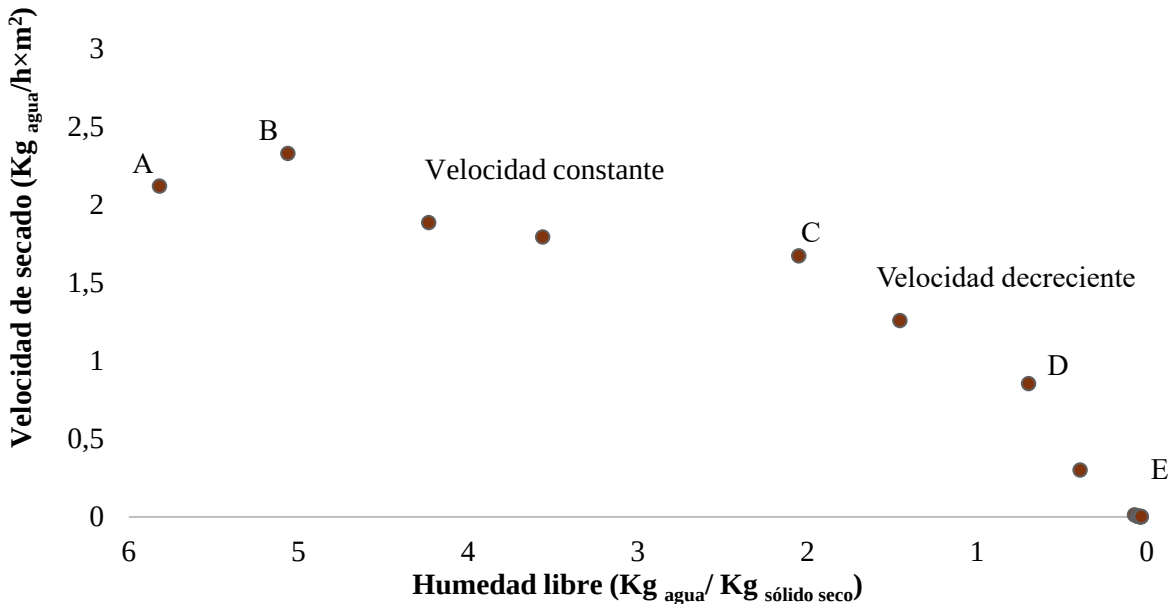


Figura 10. Curva de velocidad de secado de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas.

3.4. Modelos matemáticos de las curvas de secado

El modelado matemático de las curvas se secado permite la obtención de las constantes que se expresan en cada modelo. Tal y como lo menciona **Doymaz, (2007)**, el modelo de Fick permite la obtención de la difusividad efectiva (D_{eff}), que se relaciona con la velocidad a la cual el agua presente en el producto se transporta desde el interior del producto hacia su superficie durante el secado, causando su evaporación. En la Tabla 8 se muestran los resultados de difusividad efectiva para cada una de las muestras, en donde se puede observar que la muestra pretratada con microondas posee menor valor. **Aghbashlo et al., (2011)** y **Rafiee et al., (2010)**, mencionan que la aplicación de pretratamientos, al generar cambios moleculares en el producto, pueden mejorar la salida del agua de la materia vegetal.

La difusividad de la muestra cruda corresponde a la tasa de difusión propia de la materia vegetal, ya que no se ha visto afecciones a la estructura inicial del zapallo, con un valor de $1{,}5679\times10^{-10}$ m^2/s. Este valor es similar al obtenido en el estudio desarrollado por **Potosí-Calvache et al., (2017)**, en donde se obtuvo un valor de $1{,}66\times10^{-10}$ m^2/s para *Cucurbita moschata*.

En el caso de la muestra pretratada con agua en ebullición, se puede ver que presenta un valor de difusividad similar a la muestra control; es decir, a pesar de presentar modificaciones a la permeabilidad de las células y cambios en sus paredes celulares, estos no han generado grandes cambios sobre la rapidez a la cual se difunde el agua.

En el caso de la difusividad de la muestra pretratada con microondas se evidencia un valor inferior, puesto que la aplicación de microondas permite el aumento de la temperatura de forma rápida en el interior de la muestra, aumentando la velocidad con la cual el agua se mueve y se difunde hacia el exterior. Sin embargo, este efecto se puede atribuir a que las microondas generan la evaporación desigual de las partículas de agua, reteniendo agua en determinadas zonas de la materia vegetal.

Un estudio realizado en muestras de zanahoria negra asiática del Himalaya por **Haq et al. (2018),** evidenció un valor aproximado de difusividad de $2{,}5\times10^{-10}$ m^2/s**,** tras el aumento de la temperatura y el tiempo de aplicación de las microondas a la materia vegetal.

Tabla 8. Difusividad efectiva (D_{eff}) de las muestras de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne)

Muestra	**D_{eff} (m^2/s)**
Control	$1{,}5679 \times 10^{-10}$
Agua en ebullición	$1{,}565 \times 10^{-10}$
Vapor	$1{,}5081 \times 10^{-10}$
Microondas	$1{,}2674 \times 10^{-10}$

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en el ajuste matemático de los datos de las curvas de cinética de secado para la muestra de zapallo control (sin aplicación de pretratamientos). Se puede determinar que tras el análisis de los coeficientes de determinación (R^2), el modelo de Page presentó un mejor ajuste, mientras que el modelo con el menor R^2 fue el de Wang & Singh. En lo que respecta al análisis estadístico de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE), se puede visualizar que el modelo modificado de Page es aquel con valores más bajos, indicando su gran ajuste, seguido por el modelo de Page.

El ajuste al modelo de Page sugiere que durante el proceso la tasa de secado tiende a disminuir en el tiempo. Así también para este modelo el coeficiente *n* permite interpretar la forma en que la velocidad de secado del zapallo cambia en el tiempo; es decir, cuando este valor es cercano a 1 se indica que la velocidad de secado se reduce de forma más pronunciada, y es un comportamiento propio de alimentos con una humedad inicial elevada **(Simpson et al., 2017)**. Mientras que valores mayores de la constante *k* indica que los procesos de secado ocurren a mayor velocidad, ya que expresa la rapidez con la que la muestra pierde agua, influida por factores como las condiciones de secado (temperatura, flujo de aire y humedad del flujo de aire) **(Sander et al., 2010**).

En el estudio realizado por **Márquez-Cardozo et al., (2021),** se muestra que el mejor ajuste del comportamiento de láminas *Cucurbita máxima* fue de forma similar el modelo de Page.

Tabla 9. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE), con los datos obtenidos en la cinética de secado de la muestra control.

Modelos	**Parámetros**					R^2	**RMSE**	**MAE**
	k	***a***	***b***	***c***	***n***			
Newton	1,3126					0,9880	0,0342	0,0260
Page	0,8771				1,229	0,9943	0,0235	0,0172
Page modificado	0,8988				1,229	0,9931	0,0204	0,0136
Henderson & Pabis	1,317	1,827				0,9844	0,0307	0,0226
Logarítmico	0,8473	1,0686		0,0201		0,9875	0,0275	0,0223
Wang & Singh		0,3647	0,0334			0,8308	0,1011	0,0921

En la Figura 11 se muestra la relación entre la humedad experimental y la humedad predicha con el modelo Page, en donde se observa una tendencia prácticamente lineal y un coeficiente de determinación de 0,9952, lo que indica la bondad del ajuste.

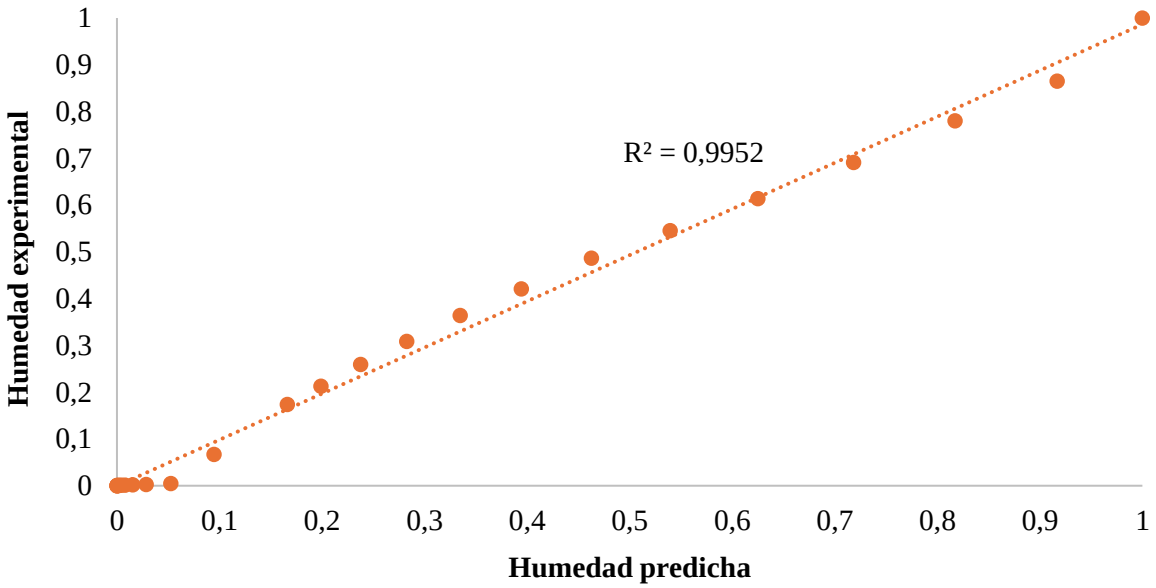


Figura 11. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de la muestra control.

En la Tabla 10 se presentan los parámetros obtenidos para la muestra de zapallo pretratada con agua en ebullición, y nuevamente los valores se ajustan de mejor manera al modelo de Page (R^2 de 0,9973 y valores bajos en RMSE y MAE). Esto puede deberse a que el modelo de Page considera las posibles variaciones en el proceso de secado tras las modificaciones a la estructura del producto **(Simpson et al., 2017).**

El modelo con menor ajuste fue el de Wang & Singh, cuyo coeficiente de determinación (R^2) presentó un valor de 0,7128. Esto se debe a que este modelo es simple y asume condiciones ideales sobre la evaporación del agua, que pueden verse modificadas por los pretratamientos debido a la alteración de las propiedades físicas del material. Así también se debe considerar que en el proceso de secado la fluctuación de la temperatura es posible, evento que no es considerado por este modelo, ya que se busca estudiar el proceso de secado manteniendo la temperatura totalmente constante **(Martinazzo et al., 2010).**

Tabla 10. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE), con los datos obtenidos en la cinética de secado de la muestra pretratada con agua en ebullición.

Modelos	**Parámetros**					R^2	**RMSE**	**MAE**
	k	***a***	***b***	***c***	***n***			
Newton	1,3796					0,9825	0,0416	0,0308
Page	1,0382				1,1955	0,9973	0,0153	0,0103
Page modificado	1,0319				1,1955	0,9972	0,0126	0,0075
Henderson & Pabis	1,319	1,3321				0,9854	0,0291	0,0193
Logarítmico	1,0660	1,1239		0,0140		0,9873	0,0271	0,0209
Wang & Singh		0,3739	0,0356			0,7128	0,1287	0,1130

En la Figura 12 se presenta la línea correspondiente a la humedad experimental frente a la humedad predicha con el modelo Page. El coeficiente de determinación presenta un valor de 0,9958, indicando una alta relación lineal.

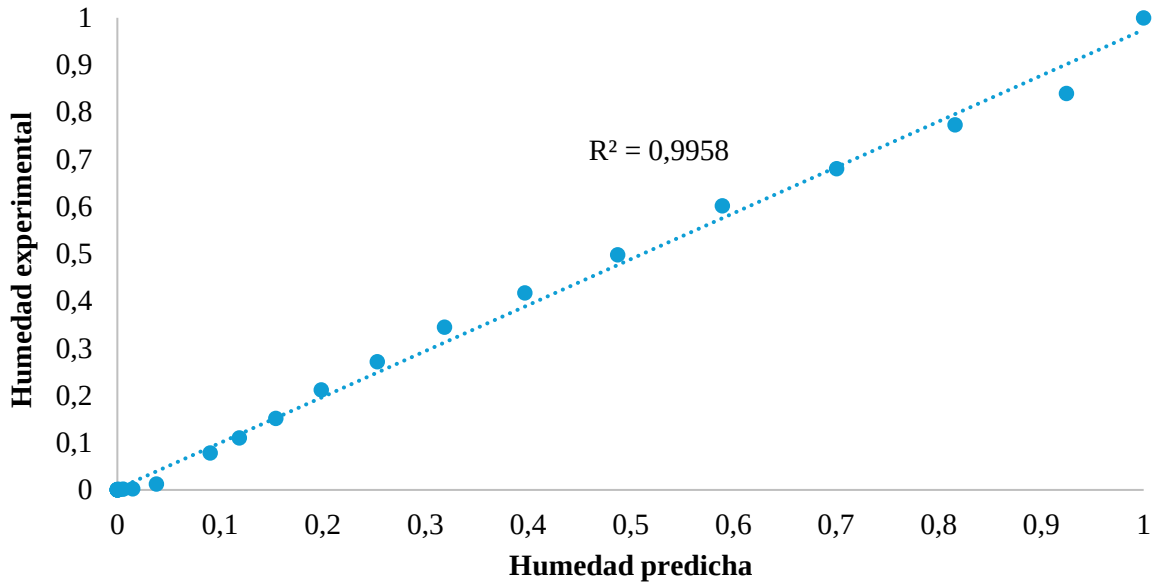


Figura 12. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición.

En la Tabla 11 se presentan los ajustes realizados a la muestra tratada con vapor. Se evidencia que los modelos con mayor valor del coeficiente de determinación (R^2) son el modelo de Page y el de Page modificado. Es importante mencionar que la diferencia entre estos dos modelos recae en que el modelo de Page modificado permite estudiar el proceso de secado de forma más precisa cuando se tienen humedades relativamente bajas. Es decir, cuando la velocidad de secado es más lenta considerando que el agua no se puede retirar totalmente de los alimentos, ya que existe agua extremamente ligada al producto que causa la disminución notable de la velocidad de secado **(Sander et al., 2010).**

Así también se presenta al modelo de Wang & Singh como el modelo de menor ajuste. En el estudio realizado por **Coradi et al., (2016),** se obtuvieron datos similares para los parámetros correspondientes al modelo especialmente el valor de *a* que corresponde a 0,2849, cuya variación se ve influenciada por las condiciones de secado como la temperatura (75°C), y la materia vegetal considerando que corresponde a muestras de granos de soya.

Tabla 11. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE), con los datos obtenidos en la cinética de secado de la muestra pretratada con vapor.

Modelos	**Parámetros**					R^2	**RMSE**	**MAE**
	k	***a***	***b***	***c***	***n***			
Newton	1,1719					0,9807	0,0466	0,0409
Page	0,5973				1,3543	0,9968	0,0189	0,0147
Page modificado	0,6835				1,3543	0,9965	0,0161	0,0122
Henderson & Pabis	1,26	2,6784				0,9838	0,0350	0,0295
Logarítmico	0,6557	1,1203		0,0335		0,9888	0,0290	0,0256
Wang & Singh		0,362	0,0311			0,9522	0,0600	0,0531

En la Figura 13 se representa la relación entre la humedad experimental frente a la humedad predicha y se evidencia que el coeficiente de determinación indica la correcta relación entre ambos (R^2 de 0,9971).

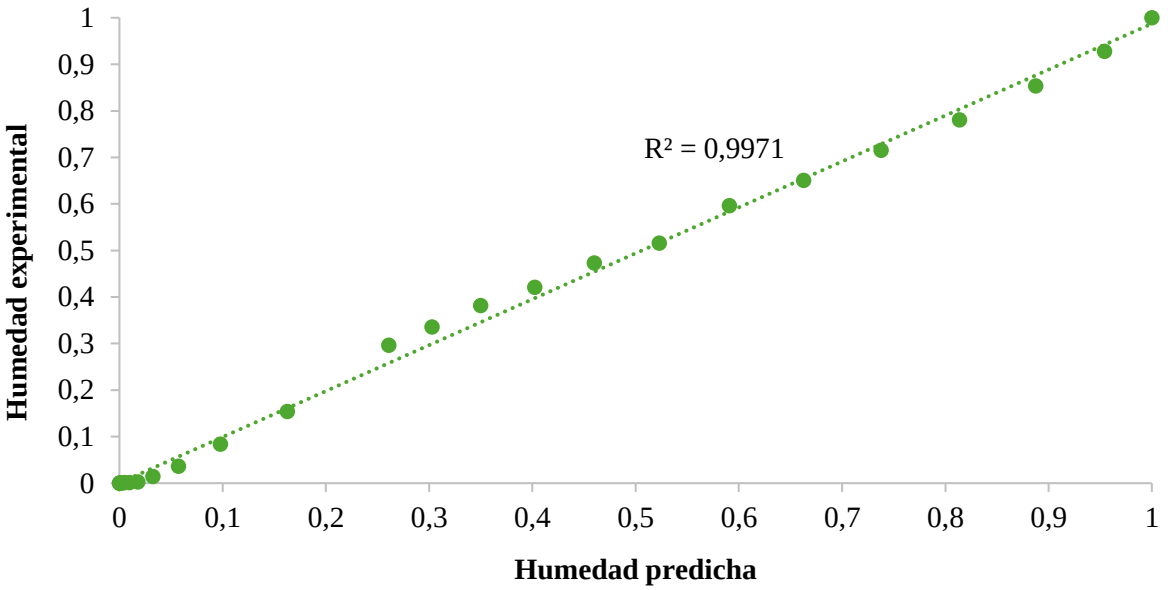


Figura 13. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor.

En la Tabla 12 se muestran finalmente los datos relacionados con la muestra pretratada con microondas. El coeficiente de determinación (R^2) más alto se observó en el modelo de Page, al igual que en los casos anteriormente mencionados. Datos similares fueron reportados por **Haq et al., (2018)**, en donde el modelo de Page fue aquel con mejor ajuste presentó en zanahoria negra asiática del Himalaya, tras el uso de microondas aplicadas por varios tiempos.

Contrariamente, el modelo de Wang & Singh presentó el peor ajuste; es decir, este modelo no expresa el comportamiento del zapallo durante el secado y mucho menos cuando éste ha sufrido cambios estructurales causados por las microondas. Esto tiene relación con lo mencionado por **Chen, (2007)**, ya que se estimas que las microondas son aquellas que por efecto de su rapidez de penetración en la materia, causan alteraciones estructurales a las células de la materia vegetal, mismas que no son consideradas por este modelo.

Así también en los que respecta al análisis de RMSE y MAE, el modelo modificado de Page es aquel con los valores más bajos en estos parámetro estadísticos.

Tabla 12. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos, coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE), con los datos obtenidos en la cinética de secado de la muestra pretratada con microondas.

Modelos	**Parámetros**					R^2	**RMSE**	**MAE**
	k	***a***	***b***	***c***	***n***			
Newton	1,2051					0,9885	0,0322	0,0239
Page	1,1238				1,0965	0,9970	0,0164	0,0100
Page modificado	1,1123				1,0965	0,9962	0,0114	0,0078
Henderson & Pabis	1,071	0,8412				0,9881	0,0244	0,0156
Logarítmico	1,1767	1,086		0,0098		0,9892	0,0231	0,0177
Wang & Singh		0,3645	0,0353			0,5766	0,1457	0,1274

La relación entre la humedad experimental y la humedad predicha para la muestra pretratada con microondas se presenta en la Figura 14. Se puede corroborar la efectividad del ajuste del modelo de Page, tras presentar un valor de 0,9972 para el coeficiente de determinación (R^2) con una tendencia claramente lineal.

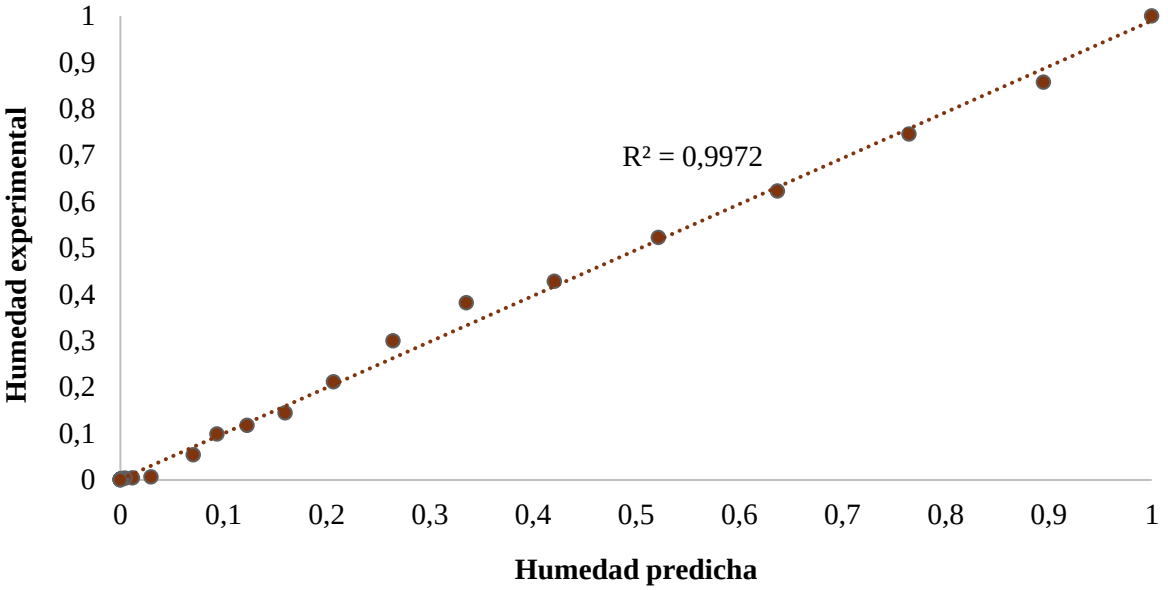


Figura 14. Humedad experimental vs. humedad predicha con el modelo de Page de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas.

3.5. Modelado matemático de las isotermas de adsorción

En la Figura 15 se presentan las curvas que demuestran el comportamiento de las isotermas de adsorción de las muestras de zapallo, atribuyéndolas a isotermas de tipo II, ya que presentan una curva convexa hacia abajo. **Abebe & Ronda, (2015),** reportan datos similares en muestras de harina de trigo (isotermas de sorción sigmoidales de tipo II).

Se puede observar que, a partir de una actividad de agua de 0,3425 la absorción de agua por parte del material incrementa con mayor intensidad (mayor humedad de equilibrio W_e). Es decir, las harinas son altamente higroscópicas, pues dada la composición química del producto, la absorción de agua ocurre a mayor velocidad. Esto se debe a que partículas como el almidón, son capaces de retener en su interior moléculas de agua por la presencia de grupos hidroxilo altamente reactivos **(Silva et al., 2020).**

La aplicación de los pretratamientos genera que existan más puntos de adsorción en el producto, especialmente debido a que por efecto de la temperatura las moléculas del almidón se hidratan, tienden a gelatinizarse y en su enfriamiento a retrogradarse. Este efecto causa que las moléculas se expandan y regresen a su lugar lo cual permite generar un tipo de flexibilidad que facilitan la adsorción de agua **(Han et al., 2019)**.

Es claro que la aplicación de microondas influye sobre la capacidad de adsorción de agua, ya que las muestra presentó valores mayores de humedad en equilibrio, lo que indica que su capacidad de adsorción es mayor, por lo cual se puede considerar como la muestra más higroscópica. Esto se debe a que las microondas pueden generar poros en las estructuras celulares, que facilitan la entrada y salida del agua del producto.

Conociendo que la capacidad de adsorción de agua de las harinas es importante durante el almacenamiento, se podría intuir que se deben conservar en condiciones en donde la humedad relativa ambiental no alcance el 60%, ya que valores superiores pueden afectar la calidad microbiológica de la harina, especialmente en aquella pretratada con microondas.

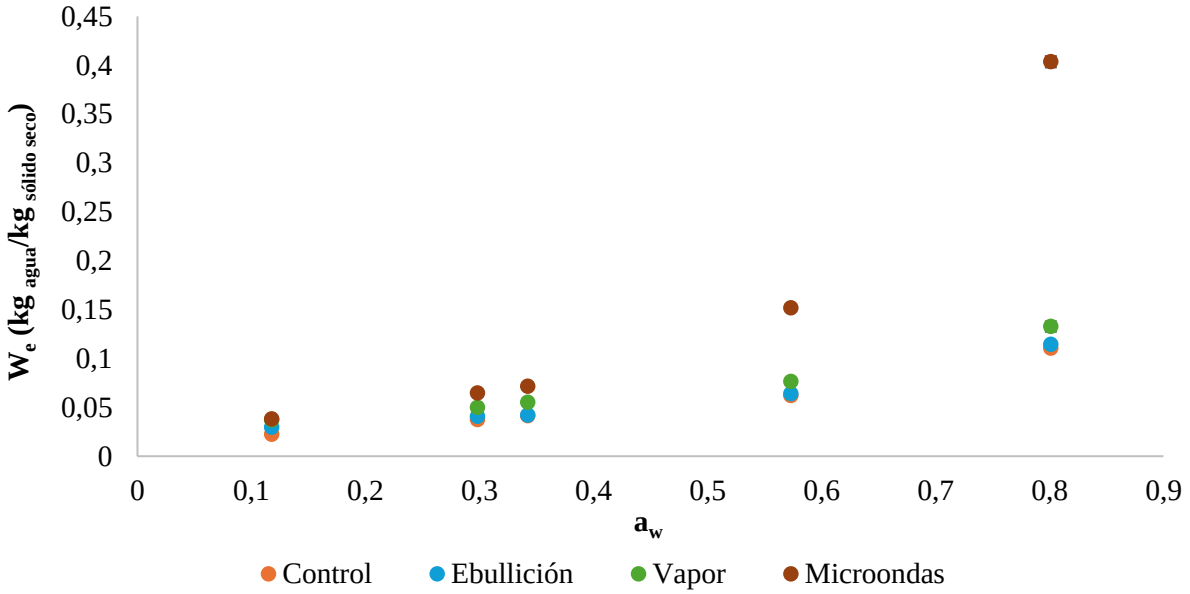


Figura 15. Curvas experimentales de isotermas de adsorción de agua de la muestra control, y las muestras pretratadas con agua en ebullición, vapor y microondas.

Los valores obtenidos en las isotermas de adsorción fueron ajustados a dos modelos matemáticos. En la Tabla 13 se presentan los resultados de la muestra control y se evidencia que tiene un mejor ajuste al comportamiento expresado por el modelo GAB. Esto indica que en esta muestra existen diferentes capas de adsorción, siendo la primera la que presenta mayor capacidad de adsorción **(Zapata et al., 2015)**.

En lo que respecta al parámetro *C*, este indica la fuerza de adsorción de la primera capa o la energía de adsorción; es decir, entre mayor sea este valor se puede asumir que la capacidad de adsorción también es superior. En el caso de esta muestra se observó un valor intermedio. Así también, la humedad en la monocapa (w_0) presentó un valor de 0,0336 g $_{agua}$/g $_{sólido\ seco}$ para el modelo GAB; es decir, la primera capa de adsorción es capaz de adsorber una mayor cantidad de agua.

El parámetro *K* propio del modelo GAB expresa la interacción entre las capas de adsorción, y se espera que mientras más cercano sea a 1, la primera capa de adsorción influya sobre la capacidad de adsorción del resto de capas consecutivas. Por ello, a pesar de que este valor es menor a 1, aún se puede considerar un valor alto expresando que la influencia es significativa, pero no altamente fuerte **(Blahovec, 2004).**

Tabla 13. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de la muestra control.

Parámetro	BET	GAB
R^2	0,9695	0,996
C	26,7232	13,2041
W_0	0,0278	0,0336
K	-	0,8782

En la Tabla 14 se presentan los resultados de la muestra sometida a agua en ebullición. Se puede establecer al modelo GAB como el mejor ajustado con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9968. Datos similares se determinaron por **Vega & Lemus, (2006),** en donde el mejor ajuste de las muestras se dio al modelo GAB con un coeficiente de determinación de 0,90 para muestras de papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*).

Así también, se puede establecer que la fuerza de adsorción en la primera capa (*C*) es mayor en esta muestra pretratada.

La constante de sorción de la multicapa (*K*) es mayor en esta muestra, indicando que existe una mayor influencia de la primera capa de adsorción. Es decir, las moléculas de agua absorbidas en la monocapa presentan mayor interacción con las moléculas de agua que se adsorben en el resto de capas.

Tabla 14. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con agua en ebullición.

Parámetro	BET	GAB
R^2	0,9967	0,9968
C	90,5432	52,4912
W_0	0,0287	0,0306
K	-	0,9177

En la Tabla 15 se presentan los resultados de la muestra pretratada con vapor y se puede observar que se tiene un ajuste para ambos modelos superior al 90 %. En esta muestra se observó un mejor ajuste con el modelo BET, cuyo coeficiente de determinación (R^2) es de 0,9987, generando una diferencia con las muestras analizadas con anterioridad.

En esta muestra la humedad adsorbida en la monocapa es mayor en relación con las muestras anteriores, siendo para el caso BET de 0,0372 g $_{agua}$/g $_{sólido\ seco}$, indicando que posiblemente la aplicación de vapor mejore la adsorción de las moléculas. **Vayas, (2023)**, reporta datos similares para W_o correspondientes para camote morado (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) en donde el valor determinado por el modelo GAB fue mayor frente al de BET con 0,0479 g $_{agua}$/g $_{sólido\ seco}$ y 0,0391 g $_{agua}$/g $_{sólido\ seco}$, respetivamente.

En lo que respecta a la constante de interacción entre las capas de adsorción (*K*), se presenta un valor menor en comparación con la muestra pretratada con agua en ebullición. Es decir, la adsorción en esta muestra ocurre más uniformemente.

Tabla 15. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con vapor.

Parámetro	BET	GAB
R^2	0,9987	0,9958
C	53,8238	52,7419
W_0	0,0372	0,0392
K	-	0,8803

Finalmente, en la Tabla 16 se presentan los resultados del ajuste realizado a los valores obtenidos en la muestra tratada con microondas. En este caso, el modelo de GAB es válido para expresar el comportamiento del fenómeno de adsorción con un coeficiente de determinación (R^2) es de 0,9572. A pesar de que el ajuste es menor en relación con las anteriores muestras, este sobrepasa el 90 % para ambos modelos.

El parámetro *C* presenta los valores más bajos en comparación con las otras muestras; sin embargo, la cantidad de agua adsorbida, esta capacidad de adsorción se debe a los mencionado con anterioridad sobre el posible aumento de la porosidad del producto por efecto de las microondas aplicadas. Se debe indicar que, a diferencia de las anteriores muestras, esta muestra presenta un valor del parámetro de *C* menor en el modelo BET frente al modelo GAB. Sin embargo, en el estudio desarrollado por **Chisté et al., (2015)**, en harina de yuca fermentada se observó una tendencia similar.

Finalmente, debido a que el parámetro *K* supera la unidad, se puede estimar que la influencia de adsorción de la primera capa es mayor considerando que esta se encuentra más cercana a la superficie, y a su vez ésta afecta al resto de capas de adsorción, generando una interacción entre las moléculas de agua.

Tabla 16. Parámetros obtenidos de los modelos matemáticos BET y GAB de zapallo (*Cucurbita máxima* Duchesne) pretratado con microondas.

Parámetro	BET	GAB
$\mathbf{R^2}$	0,9087	0,9572
C	5,2544	9,0155
$\mathbf{W_0}$	0,0703	0,0558
K	-	1,0888

CAPÍTULO IV-. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los pretratamientos aplicados al mesocarpio de zapallo afectaron de forma significativa la humedad inicial de las láminas, lo cual generó modificaciones en la velocidad del retiro de agua. Se notó que tratar las láminas con agua en ebullición y vapor, hidrató las muestras, aumentando considerablemente su humedad y actividad de agua. La aplicación de microondas permitió alcanzar una menor actividad de agua en menor tiempo de secado; mientras que, la aplicación de vapor como pretratamiento permitió aumentar la velocidad de secado.

- Las muestras pretratadas con agua en ebullición y vapor presentaron una mayor tasa de pérdida de humedad en la etapa inicial, frente a la muestra control. Este comportamiento puede deberse a que con estos pretratamientos las paredes celulares se ablandan y se aumenta la permeabilidad, lo que facilita la liberación de agua.

- En lo que respecta a las curvas de velocidad de secado, se observaron en todos los casos cuatro etapas. La primera es la etapa de adaptación, en donde se observó un aumento de la temperatura de la materia vegetal y un leve incremento de la velocidad de secado. Seguidamente se presentó la etapa dos, que corresponde a un periodo de secado en donde la velocidad tiende a ser constante. Al finalizar esta etapa se identificó la humedad crítica, que corresponde al punto en el cual la caída de la velocidad de secado tiende a disminuir de forma significativa, lo que indica que queda a disposición agua ligada que es de difícil remoción. Posteriormente se observaron las dos etapas finales, en donde la velocidad de secado decreció hasta alcanzar la humedad de equilibrio.

- El modelo de Page demostró ser el modelo matemático de mejor ajuste para todas las muestras estudiadas, basado en el coeficiente de determinación, raíz del error cuadrático medio y el error absoluto medio, permitiendo comprender el comportamiento del zapallo pretratado frente al secado. Los datos experimentales al ser comparados con los valores predichos alcanzaron un ajuste superior al 90 % en todos los casos estudiados, siendo la muestra pretratada con agua en ebullición aquella con presentó un mejor ajuste.

- El incremento de la humedad relativa del ambiente influyó sobre la humedad en equilibrio. Con estos datos se construyeron las isoterma que mostraron una tendencia de tipo II. La muestra pretratada con microondas presentó mayor higroscopicidad y por ende requerirá de un mayor control de las condiciones de almacenamiento. El modelo de GAB presentó un mejor ajuste en la muestra control y las muestras pretratadas con agua en ebullición y microondas, mientras que la muestra pretratada con vapor se ajustó mejor al modelo BET.

4.2. Recomendaciones

- Estudiar el efecto del estado de madurez del zapallo sobre los fenómenos de secado y la generación de isotermas de adsorción tras la aplicación de pretratamientos.

- Implementar el uso de sales saturadas que permitan extender el rango de humedad relativa del medio para mejorar el análisis del comportamiento de las harinas.

- Evaluar el efecto del secado del zapallo sobre la capacidad de adsorción de agua de las harinas resultantes.

MATERIALES DE REFERENCIA

Abebe, W., & Ronda, F. (2015). Flowability, moisture sorption and thermal properties of tef [Eragrostis tef (Zucc.) Trotter] grain flours. *Journal of Cereal Science*, *63*, 14-20. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.02.003

Aghbashlo, M., Kianmehr, M., Arabhosseini, A., & Nazghelichi, T. (2011). Modelling the carrot thin-layer drying in a semi-industrial continuous band dryer. *Czech Journal of Food Sciences*, *29*(6), 660-660. https://doi.org/10.17221/457/2011-CJFS

Akpinar, E. K., Bicer, Y., & Midilli, A. (2003). Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. *Journal of Food Process Engineering*, *26*(6), 515-541. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2003.tb00654.x

Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology*, *40*(8), 1445-1451. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.09.002

Andersson, J., Garrido-Bañuelos, G., Bergdoll, M., Vilaplana, F., Menzel, C., Mihnea, M., & Lopez-Sanchez, P. (2022). Comparison of steaming and boiling of root vegetables for enhancing carbohydrate content and sensory profile. *Journal of Food Engineering*, *312*, 110754. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110754

Blahovec, J. (2004). Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach. *Journal of Food Engineering*, *65*(4), 489-495. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.012

Cardona, F. (2020). *Actividad del agua en alimentos: Concepto, medida y aplicaciones*. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/121948/Cardona%20-%20ACTIVIDAD%20DEL%20AGUA%20EN%20ALIMENTOS%3A%20CONCEPTO%2C%20MEDIDA%20Y%20APLICACIONES.pdf?sequence=1

Chen, G., & Murray Douglas, W. J. (1999). Quantification of through drying rate data. *Drying Technology*, *17*(7-8), 1707-1723. https://doi.org/10.1080/07373939908917647

Chen, X. D. (2007). Moisture Diffusivity in Food and Biological Materials. *Drying Technology*, *25*(7-8), 1203-1213. https://doi.org/10.1080/07373930701438592

Chisté, R. C., Cardoso, J. M., Silva, D. A. D., & Pena, R. D. S. (2015). Hygroscopic behaviour of cassava flour from dry and water groups. *Ciência Rural*, *45*(8), 1515-1521. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140338

Codex. (2025). *Codex Stan 152 for wheat flour*. Codex alimentarius, 1985.

Coradi, P. C., Fernandes, C. H. P., & Helmich, J. C. (2016). Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *20*(4), 385-392. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n4p385-392

Dimitrovski, T. (2022). Evaluation of the tropical cucurbit chayote Sechium edule (Jacq.) Sw. Var. Albus spinosum under the temperate climate conditions of North Macedonia. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, *6*(1), 154-167. https://doi.org/10.46291/ISPECJASvol6iss1pp154-167

Doymaz, İ. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, *79*(1), 243-248. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.049

Elshrif, A., & Salah, Z. (2023). Effect of various thermal techniques and frozen storage on some chemical component and phytochemical compounds of green beans and broccoli. *Minia Journal of Agricultural Research and Development*, *43*(2), 87-101. https://doi.org/10.21608/mjard.2023.302450

Geankoplis, C. (2006). Evaporación. En *Procesos de transporte y principios de procesos de separación* (Cuarta, pp. 541-625). CECSA.

Han, H., Hou, J., Yang, N., Zhang, Y., Chen, H., Zhang, Z., Shen, Y., Huang, S., & Guo, S. (2019). Insight on the changes of cassava and potato starch granules during gelatinization. *International Journal of Biological Macromolecules*, *126*, 37-43. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.201

Haq, R., Kumar, P., & Prasad, K. (2018). Effect of microwave treatment on dehydration kinetics and moisture diffusivity of Asiatic Himalayan black carrot. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *17*(4), 463-470. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.004

INEN. (2013). *Cereales y productos de cereales. Determinación del contenido de humedad. Método básico de referencia*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. https://es.scribd.com/document/653998348/NTE-INEN-1462-CEREALES-DETERMINACION-CONT-DE-HUMEDAD

Khraisheh, M. A. M., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2000). A multiple regression approach to the combined microwave and air drying process. *Journal of Food Engineering*, *43*(4), 243-250. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00158-2

Lima, R. B., Dos Santos, T. B., Vieira, L. G. E., Ferrarese, M. D. L. L., Ferrarese-Filho, O., Donatti, L., Boeger, M. R. T., & Petkowicz, C. L. D. O. (2013). Heat stress causes alterations in the cell-wall polymers and anatomy of coffee leaves (Coffea arabica L.). *Carbohydrate Polymers*, *93*(1), 135-143. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.015

Maldonado, R., & Pacheco, E. (2003). Curvas de deshidratación del brócoli (Brassica oleraceae L var. Italica Plenk) y coliflor (Brassica oleraceae L var. Botrytis L). *Revista Farmacológica Agronómica*, *20*, 306-319.

Márquez-Cardozo, C. J., Caballero-Gutiérrez, B. L., Ciro-Velázquez, H. J., & Restrepo-Molina, D. A. (2021). Effect of pretreatment and temperature on the drying kinetics and physicochemical and techno-functional characteristics of pumpkin (Cucurbita maxima). *Heliyon*, *7*(4), e06802. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06802

Martinazzo, A. P., Melo, E. C., Corrêa, P. C., & Santos, R. H. S. (2010). Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [Cymbopogon citratus (DC.) Stapf]. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, *12*(4), 488-498. https://doi.org/10.1590/S1516-05722010000400013

Martínez, N., Grau, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Isotermas de sorción. En *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno* (Primera, pp. 153-180). Instituto Politécnico Nacional.

Potosí-Calvache, D. C., Vanegas-Mahecha, P., & Martinez Correa, H. A. (2017). Convective drying of squash (Cucurbita moschata): Influence of temperature and air velocity on effective moisture diffusivity, carotenoid content and total phenols. *DYNA*, *84*(202), 112-119. https://doi.org/10.15446/dyna.v84n202.63904

Praveen Kumar, D. G., Hebbar, H. U., & Ramesh, M. N. (2006). Suitability of thin layer models for infrared–hot air-drying of onion slices. *LWT - Food Science and Technology*, *39*(6), 700-705. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.03.021

Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S. S., & Mobli, H. (2010). Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange Slice (Thompson Cv.). *International Journal of Food Properties*, *13*(1), 32-40. https://doi.org/10.1080/10942910802144345

Ratnayake, W. S., & Jackson, D. S. (2007). A new insight into the gelatinization process of native starches. *Carbohydrate Polymers*, *67*(4), 511-529. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.025

Rodríguez, N. (2020). *Presiones de vapor. Balances de Materia y Energía*.

Sander, A., Kardum, J. P., & Glasnović, A. (2010). Drying of solids; estimation of the mathematical model parameters. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, *88*(5), 822-829. https://doi.org/10.1002/cjce.20346

Silva, H. A., Gomes, J. P., & Queiroz, A. J. D. M. (2020). Hygroscopic Behavior and Thermodynamic Properties of Ziziphus joazeiro Mart. Kernel Flour. *Journal of Agricultural Studies*, *8*(3), 50. https://doi.org/10.5296/jas.v8i3.15976

Silveira, A. (2017). Uso de aditivos y métodos físicos para mantener la calidad de los productos de IV gama o mínimamente procesados. *Agrociencia*, *21*(1).

Simpson, R., Ramírez, C., Nuñez, H., Jaques, A., & Almonacid, S. (2017). Understanding the success of Page's model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices. *Trends in Food Science & Technology*, *62*, 194-201. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.003

Tecante, A. (2009). Secado. En *Fundamentos de secado, extracción sólido-líquido y destilación* (Segunda, Vol. 1, p. 71).

Tiebe, C., Detjens, M., Fechner, A., Sielemann, S., Lorek, A., Wernecke, R., & Stoltenberg, H. (2018). Development of a Device for Staged Determination of Water Activity and Moisture Content. *EUROSENSORS 2018*, 881. https://doi.org/10.3390/proceedings2130881

Trujillo-Echeverria, L., Pinanjota Guaytarilla, H. G., & Lara Fiallos, M. V. (2024). Effect of drying parameters on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of lemon balm (Melissa officinalis L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *77*(2), 10751-10763. https://doi.org/10.15446/rfnam.v77n2.108992

Umuhozariho, M., Hagenimana, T., Nsabimana, P., Sirimu, C., Uwobasa, N., & Uwineza, A. (2020). Effect of oven and freeze drying on nutricional composition of Pumpkin (Cucurbita maxima) Processed flour. *Rwanda journal of agricultural sciences*, *2*(1), 33-39.

Vayas, M. (2023). *Modelado de la cinética de secado convectivo e isotermas de adsorción de agua de camote morado (Ipomoea batatas) y mashua (Tropaeolum tuberosum), provenientes de la provincia de Tungurahua* [Grado, Universidad Técnica de Ambato]. https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e1fa9f4c-7383-459f-b8c8-8bf71ad20177/content

Vega, A. A., & Lemus, R. A. (2006). Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (Vasconcellea pubescens). *Información Tecnológica*, *17*(3). https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000300005

Zapata, J., Quintero, Ó., & Porras, L. (2015). Isotermas de sorción para avena (Avena sativa) en grano. *Rev. Agron*, *23*(1), 82-92.