



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN
ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y ecuaciones de ajuste: una revisión bibliográfica de datos publicados

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

Autor: Darwin Rene Caiza Mañay

Tutora: Ing. Liliana Patricia Acurio Arcos M.Sc.

Ambato - Ecuador

Septiembre - 2021

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

CERTIFICA:

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

Ambato, 30 de Julio del 2021

Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

C.I. 1804067088

TUTORA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Caiza Mañay Darwin Rene, manifiesto que los resultados propuestos en el presente Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Alimentos, son totalmente originales, auténticos, y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Caiza Mañay Darwin Rene

C.I.: 0504060617

AUTOR

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO

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

Para constancia firman:

Presidente del Tribunal

Dr. Esteban Mauricio Fuentes Pérez PhD

C.I. 1803321502

Dr. Santiago Esmiro Cadena Carrera

C.I. 1715602593

Ambato, 27 de Agosto de 2021

DERECHOS DE AUTOR

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

Cedo los Derechos en línea patrimonial de mi 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 respetando mis derechos de autor.



Darwin Rene Caiza Mañay

C.I.: 0504060617

AUTOR

DEDICATORIA

A mis padres Salomón y Zoila por darme la vida, por su apoyo incondicional en mi etapa académica, por su sacrificio económico, porque gracias a ustedes he cumplido una meta más en mi vida lo que siempre he querido ser.

Los quiero muchísimo.

A mi hermano Cristian por su aliento a seguir siempre adelante.

A quienes me brindaron sus consejos y apoyo cuando más lo necesite.

A mi querida y amada Gissela por su apoyo incondicional.

Principalmente a mi hijo, Darwin Sebastián, quien ha llegado a ser mi inspiración para seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por regalarme la salud y la vida, por regalarme a la mejor familia del mundo y por bendecirme siempre en las cosas que realizo.

A mis queridos padres Salomón y Zoila, gracias por su apoyo incondicional en cada momento de mi vida, por su ejemplo de perseverancia, por cada sacrificio que han hecho por ver a sus hijos triunfadores y principalmente por el cariño y afecto que tienen hacia mí.

A toda mi familia y amigos, porque con sus sabios consejos he llegado a ser un profesional.

A mi querido hermano Cristian, porque cada palabra, cada consejo, cada experiencia vivida junto a ti me ha enseñado lo bonito que es la vida, a pesar de las circunstancias vividas.

A mi querido y amado hijo, Darwin Sebastián, por ser mi fuente de inspiración

A mi amada Gissela por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

Agradezco de manera sincera a mi tutora la Ing. Liliana Patricia Acurio Arcos M.Sc. por brindarme su apoyo, confianza y sobre todo por la paciencia que ha tenido en la ejecución del presente proyecto de investigación.

A mis panitas de la Universidad, porque con ellos he pasado la mayor parte de mi vida universitaria, realizando actividades que siempre.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Aprobación de la tutora	ii
Aprobación del tribunal de grado	iv
Resumen ejecutivo.....	xiii
Abstract.....	xiv
CAPÍTULO I.....	14
MARCO TEÓRICO	14
1.1. Antecedentes investigativos.....	14
1.1.1. Justificación.....	14
1.1.2. Fundamentación científico-técnica	15
1.1.2.1. Alimentos pulverulentos.....	15
1.1.2.2. Isotermas de sorción	16
1.1.2.3. Clasificación de isotermas de sorción según su proceso	17
a. Adsorción.....	17
b. Desorción	18
1.1.2.4. Clasificación según su forma y proceso	18
a. Tipo 1.- Isotermas similares	19
b. Tipo 2.- Isoterma sigmoidea.....	19
c. Tipo 3.- Isoterma de Flory-Huggins	19
d. Tipo 4.- Isoterma de adsorción.....	19
e. Tipo 5.- Isoterma de adsorción multicapa BET	19
1.1.2.5. Ecuaciones de ajuste.....	19
1.2. Objetivos	21

1.2.1. Objetivo general.....	21
1.2.2. Objetivos específicos	21
CAPÍTULO II.....	22
METODOLOGÍA.....	22
2.1. Materiales.....	22
2.2. Métodos	22
2.2.1. Definición del problema.....	22
2.2.2. Organización de la información	22
2.2.3. Análisis de la información	23
CAPÍTULO III	24
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1. Análisis y discusión de los resultados.....	24
3.1.1. Pulpa de guanábana en polvo.....	24
3.1.2. Pulpa de guayaba en polvo	25
3.1.3. Pulpa de lulo en polvo	27
3.1.4. Polvo de guanábana	28
3.1.5. Polvo de cajá.....	29
3.1.6. Polvo de pulpa liofilizada de mangaba	30
3.1.7. Polvo de calabaza con maltodextrina.....	32
3.1.8. Harina de yuca	33
3.1.9. Harina de Kiwicha variedad Oscar Blanco.....	34
3.1.10. Harina de sorgo cruda y harina de sorgo extruida	36
3.1.11. Harina de sorgo integral cruda.....	37
3.1.12. Almidón de quinua.....	38

3.1.13. Leche en polvo.....	39
3.1.14. Café molido.....	40
3.1.15. Condimento en polvo con Tucupi.....	41
3.2. Contraste de los resultados obtenidos en las diferentes fuentes bibliográficas ...	42
3.3. Propuesta de usos de la información recopilada en la producción alimentaria ...	49
CAPÍTULO IV	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
4.1. Conclusiones	50
4.2. Recomendaciones	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones para el modelo matemáticos de las isothermas de sorción.....	20
Tabla 2. Resultados encontrados en ecuaciones de ajuste para isothermas de sorción en alimentos pulverulentos mediante el coeficiente de determinación R2	45
Tabla 3. Resultados del porcentaje de error para el cálculo matemáticos de las ecuaciones de ajuste para isothermas de sorción en alimentos pulverulentos.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Isoterma de sorción para un producto alimenticio típico.....	17
Figura 2. Tipos de isothermas de sorción según forma y proceso.	18
Figura 3. Isothermas de sorción para pulpa de guanábana en polvo.....	24
Figura 4. Isothermas de sorción de pulpa de guayaba en polvo con 4% de albúmina	25
Figura 5. Isothermas de sorción para pulpa de guayaba en polvo con 8% de albumina. 26	
Figura 6. Isotherma de sorción para pulpa de lulo en polvo	27
Figura 7. Isothermas de sorción del polvo de guanábana ajustado a modelo de GAB ...	28
Figura 8. Isothermas de sorción para polvo de cajá	29
Figura 9. Isotherma de sorción para polvo de pulpa liofilizada de mangaba.....	31
Figura 10. Isotherma de sorción para polvo de calabaza con maltodextrina	33
Figura 11. Isotherma de sorción para harina de yuca ajustada al modelo de Peleg	34
Figura 12. Isotherma de sorción de harina de kiwicha.....	35
Figura 13. Isotherma de sorción harina de sorgo crudo * y harina de sorgo extruida	36
Figura 14. Isotherma de sorción de humedad para harina de sorgo integral cruda.....	38
Figura 15. Isotherma de sorción para almidón de quinua ajustado al modelo de Peleg .	38
Figura 16. Isotherma de sorción de leche en polvo antes y después de la rehidratación	39
Figura 17. Isotherma de sorción de humedad para café molido a 25°C.....	40
Figura 18. Isotherma de sorción de humedad para café molido a 30°C	41
Figura 19. Isothermas de adsorción y desorción de Tucupi en polvo	42

RESUMEN

El sector alimentario a nivel mundial ha sufrido gran impacto por factores ambientales, es así que se busca constantemente técnicas que permite la mayor conservación de las propiedades higroscópicas de un alimento. El objetivo principal del trabajo de investigación es evaluar las isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y las ecuaciones de ajuste más utilizadas.

La metodología aplicada trata de una revisión bibliográfica en la que se busca información actualizada del carácter investigativo en: artículos científicos, libros y publicaciones referentes a la temática establecida. Se analizaron la isotermas de sorción en productos alimenticios como: pulpas en polvo, polvo de cajá, polvo de guanábana, polvo de pulpa liofilizada de mangaba, polvo de calabaza con maltodextrina, harina de yuca, harina de Kiwicha variedad Oscar Blanco, harina de sorgo integral cruda, harina de sorgo cruda y harina de sorgo extruida, almidón de quinua, leche en polvo, café molido y condimento en polvo con Tucupi; todos del tipo pulverulento, además se logró determinar los modelos matemáticos que mejor se ajustan a las isotermas de sorción mediante el coeficiente de determinación cuadrático y el porcentaje de error establecido para el cálculo de los modelos matemáticos descritos por: GAB, BET, Henderson, Oswin, Halsey, Kuhn, Mizrahi, Ferro-Foltan, Peleg y Caurie. Los resultados de la investigación se representan en gráficos y tablas para su mejor comprensión. En conclusión, el trabajo permite conocer que en la industria alimentaria la aplicación de isotermas de sorción y sus ecuaciones de ajuste permiten mejorar la calidad y vida útil de los alimentos.

Palabras claves: Investigación bibliográfica, isotermas de sorción, alimentos pulverulentos, industria alimentaria, contenido de humedad.

ABSTRACT

The food sector worldwide has suffered a great impact due to environmental factors, which is why techniques are constantly being sought that allow the greater conservation of the hygroscopic properties of a food. The main objective of the research work is to evaluate the sorption isotherms in powdery foods and the most used adjustment equations.

The applied methodology deals with a bibliographic review in which up-to-date information of the investigative nature is sought in: scientific articles, books and publications referring to the established topic. Sorption isotherms were analyzed in food products such as: pulps powder, cajá powder, soursop powder, freeze-dried mangaba pulp powder, pumpkin powder with maltodextrin, cassava flour, Oscar Blanco variety Kiwicha flour, raw whole wheat sorghum flour, raw sorghum flour and extruded sorghum flour, quinoa starch, powdered milk, ground coffee and powdered seasoning with Tucupi; all of the powdery type, in addition, it was possible to determine the mathematical models that best fit the sorption isotherms by means of the quadratic coefficient of determination and the percentage of error established for the calculation of the mathematical models described by: GAB, BET, Henderson, Oswin, Halsey, Kuhn, Mizrahi, Ferro-Foltan, Peleg and Caurie. The results of the investigation are represented in graphs and tables for better understanding. In conclusion, the work allows us to know that in the food industry the application of sorption isotherms and their adjustment equations allow to improve the quality and useful life of the food.

Keywords: Bibliographic research, sorption isotherms, powdered foods, food industry, moisture content.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes investigativos

1.1.1. Justificación

Es fundamental empezar señalando que en la última década el sector alimentario ha sufrido un gran impacto a nivel mundial, y debido a que es prácticamente uno de los sectores industriales más importante, se ha visto en la necesidad de innovar constantemente la tecnología de producción, con la finalidad de proporcionar productos inocuos y de mayor calidad (**Rubio Somoza, 2018**). Además, la industria alimentaria invierte constantemente en el desarrollo de operaciones que permitan alargar el tiempo de consumo, con lo que de manera implícita también se logra comercializar los alimentos en destinos más alejados de la zona de producción.

Ecuador al contar con las condiciones climáticas óptimas para la agroindustria, es conocido como un país productor de cereales y otros productos alimenticios, mismos que son la base para la elaboración de productos en polvo que son destinados para la alimentación tanto humana como animal (**Lema Aguirre et al., 2017**).

Si bien los productos pulverulentos ocupan un amplio espacio en la percha local, para lograr un almacenamiento correcto se deben considerar parámetros como la actividad de agua (**Hawa et al.**). La metodología más utilizada en el análisis del efecto de esta propiedad sobre los alimentos son las isotermas de sorción, debido a que permite predecir las condiciones óptimas de almacenamiento y distribución frente a cambios de humedad, temperatura y a_w , y además permiten determinar la vida de anaquel (**Choque Quispe et al., 2018**).

Además, un modelamiento de sorción-desorción adecuado permite determinar las condiciones óptimas del proceso de secado (**Brousse et al., 2017; Hincapié Mejía et al., 2018**).

Bajo los antecedentes previamente planteados, el presente estudio bibliográfico sobre isotermas de sorción en alimentos pulverulentos y sus ecuaciones de ajuste, proporciona información sintetizada y precisa, que podrá ser ampliamente utilizada por la industria alimentaria y futuros proyectos de investigación.

1.1.2. Fundamentación científico-técnica

1.1.2.1. Alimentos pulverulentos

Los alimentos pulverulentos se obtienen previo a un proceso de secado en el que se elimina la mayor cantidad de agua libre, razón por la que presentan una larga vida de anaquel. Y los procesos de secado utilizados van desde la deshidratación con aire caliente tradicional, hasta el secado por aspersion para alimentos muy consistentes como el guacamole (**Estrada et al., 2017**).

Según **Moura et al. (2020)**, las industrias que producen este tipo de alimentos se han expandido progresivamente debido a las ventajas de conservación y comercialización que presentan este tipo de alimentos. Sin embargo, dichas industrias también se enfrentan a grandes inconvenientes con sus productos, debido a la presencia de factores físicos como la presión, temperatura y humedad (**Pomar Martínez, 2021**).

Según **Felicetti et al. (2020)**, en los alimentos pulverulentos es de vital importancia el conocimiento de sus propiedades físicas, químicas, microbiológicas, así como el grado de interacción de sus componentes, debido a que esto determina las propiedades intrínsecas del polvo y permite establecer las condiciones óptimas de procesamiento, almacenamiento (incluyendo la velocidad de vertido en silos o tolvas) y distribución (**Alvarado, 2014; Lopes Neto et al., 2009**).

1.1.2.2. Isotermas de sorción

Según **Machado Baptestini et al. (2020)**, los alimentos deshidratados son capaces de absorber agua del entorno hasta llegar al equilibrio, llegando a perturbar su actividad acuosa. Esta absorción genera cambios de textura debido a modificaciones estructurales de conformación, altera energéticamente las vías hacia los sitios polares causando alteraciones en el movimiento del agua, variación en la coloración e incluso facilita el crecimiento microbiano (**Al Muhtaseb et al., 2004; Leite Medeiros & da Silva Lannes, 2010**).

Una manera de controlar dichos cambios es mediante el análisis de las isotermas de sorción o curvas de equilibrio higroscópico. Las isotermas muestran la relación de equilibrio entre el volumen del agua absorbido (actividad de agua) y la humedad relativa (humedad en equilibrio), en función a la temperatura de determinación (**de Sousa et al., 2016; Moussaoui et al., 2019; Muzaffar & Kumar, 2016; Sormoli & Langrish, 2015**).

Su análisis contempla propósitos tanto básicos como prácticos. Los básicos involucran el análisis de la cantidad de agua ligada en el alimento mediante la determinación del contenido de humedad presente en la monocapa; mientras que los fines prácticos permiten predecir las condiciones óptimas de deshidratación, formulación, almacenamiento y determinar la vida de anaquel de un producto (**Bohorquez et al., 2016; Ramírez Miranda et al., 2014**).

Además, según **R. Andrade et al. (2011)**, las isotermas de sorción pueden darse a partir de procesos de adsorción o desorción, entre estas dos curvas existe una diferencia que es conocida como histéresis, que se presenta cuando la adsorción y desorción poseen diferentes valores de humedad en equilibrio (Figura 1). Además, se pueden dividir en regiones, en la A el agua está fuertemente ligada y la entalpía de vaporización es mayor que la del agua pura. En la región B las moléculas de agua son menos firmes, mientras que en la región C el agua presenta características similares al agua libre y se une débilmente a los productos alimenticios (**Anria et al., 2019**).

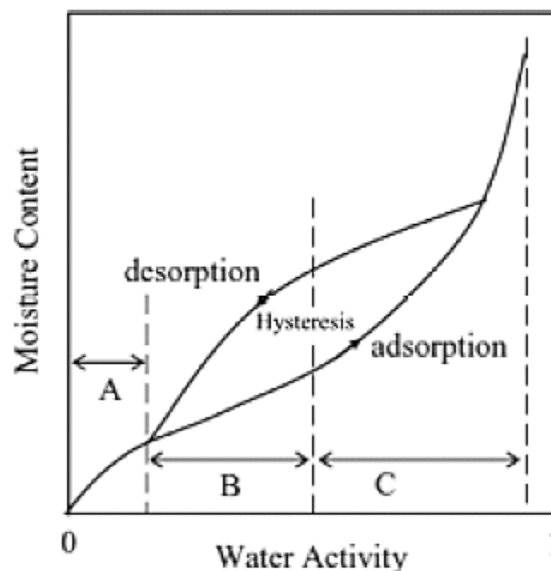


Figura 1. Isoterma de sorción para un producto alimenticio típico.

Fuente: Mathlouthi y Rogé (2003).

La aplicación de las isotermas de sorción en alimentos pulverulentos ha sido ampliamente estudiada por varios autores, como por ejemplo en: pulpa de guanábana en polvo (**Barros Cavalcante et al., 2018; Machado Baptestini et al., 2020**), pulpa de cajá en polvo (fruta pequeña y aromática de los bosques de México, Perú y Brasil) (**Gomes et al., 2019**), pulpa de guayaba en polvo (**Maciel et al., 2020**), condimento de Tucupi en polvo (**Costa et al., 2017**), entre otros.

1.1.2.3. Clasificación de isotermas de sorción según su proceso

a. Adsorción

Las isotermas de adsorción según **Choque Quispe et al. (2018)**, es la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad presente en un material en el momento en el que se encuentran completamente en equilibrio, bajo condiciones de temperatura constante. Se denomina de adsorción cuando el proceso de equilibrio inicia en una muestra seca hasta lograr el equilibrio con el aire circundante, teniendo como resultado ganancia de humedad, de esta manera se logra conocer como el agua se liga al sistema.

b. Desorción

Las isothermas de desorción se obtienen a partir de un material húmedo que se pone bajo condiciones similares de humedad relativa, controlando la pérdida de peso del material en base a su humedad inicial, es por ello que, el proceso de desorción de humedad proporciona un efecto contrario al proceso de adsorción (López Valencia, 2017). Además, según Rodrigues do Carmo y da Silva Pena (2019), la humedad de la monocapa en este tipo de isothermas se determina mediante coeficientes obtenidos por regresión lineal del modelo matemático propuesto por BET.

1.1.2.4. Clasificación según su forma y proceso

Según Mathlouthi y Rogé (2003), las isothermas se pueden clasificar de acuerdo a su forma de diseño y proceso de ejecución como se muestra en la Figura 2.

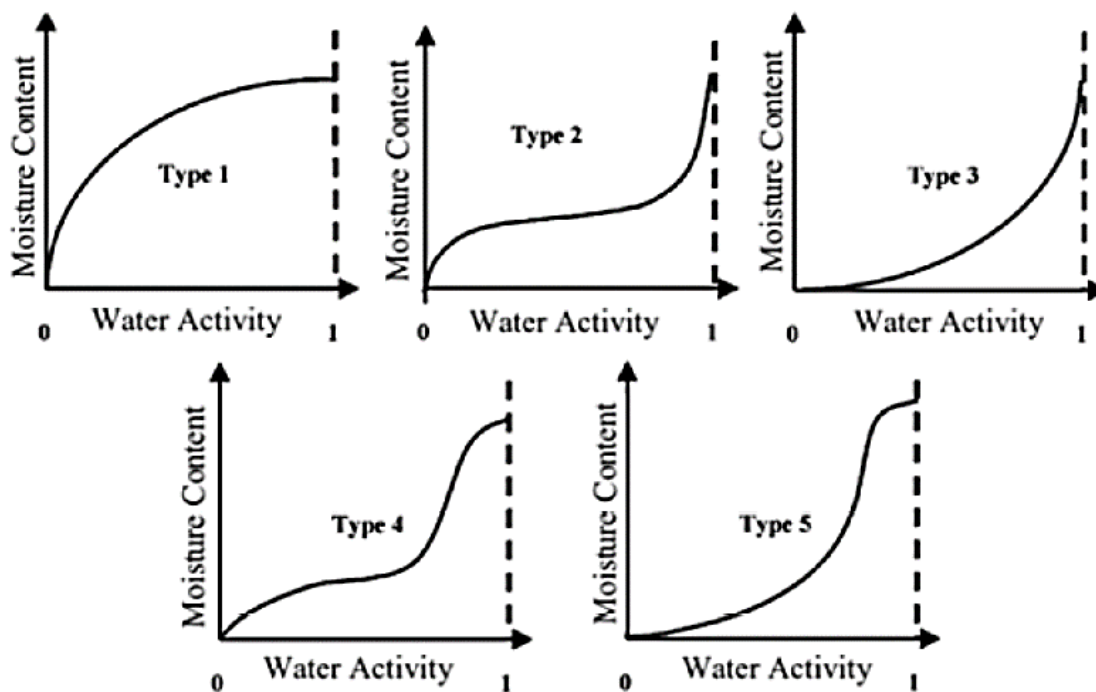


Figura 2. Tipos de isothermas de sorción según forma y proceso.

Fuente: Mathlouthi y Rogé (2003).

a. **Tipo 1.-** Isotermas similares

Presentan un incremento en la actividad de agua y su contenido de humedad, generando curvaturas convexas hacia arriba. Este tipo de isotermas permiten analizar el llenado de agua en la capa monomolecular dentro de la superficie interna de un material.

b. **Tipo 2.-** Isoterma sigmoidea

En base a lo establecido por **Peleg (2019)**, una isoterma de este tipo invierte su dirección de concavidad justo en el punto de inflexión, y al determinar la segunda derivada de la función en este punto, se halla un valor igual a cero.

c. **Tipo 3.-** Isoterma de Flory-Huggins

Se observa este comportamiento en presencia de un solvente, como por ejemplo glicerol, a una temperatura por encima de la que se genera la transición vítrea, y genera una tendencia en forma de una curvatura convexa hacia abajo.

d. **Tipo 4.-** Isoterma de adsorción

Describe el hinchamiento sólido hasta llegar al punto máximo de hidratación posible.

e. **Tipo 5.-** Isoterma de adsorción multicapa BET

Este tipo de isotermas se generan por la adsorción de vapor de agua sobre carbón, se encuentra altamente relacionado con las isotermas de sorción tipo 2 y tipo 3.

1.1.2.5. Ecuaciones de ajuste

Existen varios modelados matemáticos que se ajustan a las isotermas de sorción; los parámetros calculados a través de éstos, facilitan el análisis y toma de decisiones mediante la aplicación de criterios estadísticos (Tabla 1). Los más conocidos son los modelos de Guggenheim-Anderson-Boer (GAB) y Brunauer, Emmet y Teller (BET) (**Choque Quispe et al.**) (**E. T. Andrade et al., 2017; Prieto García et al., 2017; Sandoval et al., 2020**), estos modelos matemáticos permiten analizar el comportamiento higroscópico que presentan los productos en presencia de diferentes valores de humedad relativa (**Collazo Abreu et al., 2018; Guzmán Hincapié & Zapata, 2018**).

Según **Abdullah et al. (2020)**, el modelo matemático de BET se limita básicamente a una a_w de entre 0.05 y 0.45; mientras que el modelo de GAB es aplicable hasta a_w de 0.9. Además, el modelo de GAB, en comparación con los modelos de Owsin y Peleg, proporciona un estimado del contenido de humedad de la monocapa.

Tabla 1. Ecuaciones para el modelo matemáticos de las isothermas de sorción

Modelo	Ecuación
BET	$M_w = \frac{M_0 \times C \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 + (C - 1) \times a_w)}$
GAB	$M_w = \frac{M_0 \times C \times K \times a_w}{(1 - K \times a_w) \times (1 - K \times a_w + C \times K \times a_w)}$
Owsin	$M_w = C \times \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^n$
Halsey	$M_w = \left(-\frac{C}{\ln(a_w)} \right)^{\frac{1}{n}}$
Peleg	$M_w = C_1 \times a_w^{C_3} + C_2 \times a_w^{C_4}$
Chirife	$M_w = \exp(C_1 + C_2 \times \ln(C - \ln(a_w)))$
Smith	$M_w = C_1 + C_2 \times \ln(1 - a_w)$
Lagmuir	$M_w = \frac{M_0 \times C \times a_w}{1 + (C \times a_w)}$
Chen	$a_w = \exp(K + (C_1 \times e^{C_2 \times M_w}))$
Henderson	$M_w = 0.01 \times \left(-\frac{\log(1 - a_w)}{10^f} \right)^{\frac{1}{n}}$
Caurie	$M_w = \exp\left(a_w \times \ln(r) - \frac{1}{4.5x_s} \right)$

* M_w = contenido de humedad en equilibrio; M_0 = valor monocapa molecular; a_w = actividad de agua a temperatura constante; C_n , K , f = constantes características del material; x_s = contenido de humedad para proporcionar la máxima estabilidad del producto deshidratado en el almacenamiento.

Fuente: **Al Muhtaseb et al. (2004); Anria et al. (2019); Bustos Vanegas et al. (2018); Bahammou et al. (2020); Guzmán Hincapié y Zapata (2018).**

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Evaluar las isothermas de sorción en alimentos pulverulentos y las ecuaciones de ajuste más utilizadas, mediante revisión bibliográfica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Recopilar documentación indexada referente a las isothermas de sorción en alimentos pulverulentos y las ecuaciones de ajuste más utilizadas.
- Contrastar los resultados presentados por las diferentes fuentes acerca de las ecuaciones más utilizadas, mediante tablas y gráficas.
- Proponer usos de la información recopilada con la finalidad de que sea utilizada para mejorar la producción alimentaria.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Materiales

En el presente trabajo se utilizaron las bases de datos bibliográficas de acceso disponibles a través de sistema integrado de la Universidad Técnica de Ambato, como lo son: Ebook Central, Pro-Quest, Scopus, Springer, eLibro, Scielo y Wiley Online Library. Las referencias que aportaron en la discusión fueron vinculadas al gestor de referencias bibliográficas Mendely, con el objetivo de mantenerlas organizadas.

2.2. Métodos

La metodología propuesta en la presente revisión bibliográfica puede ser aplicada a cualquier tema de investigación, para determinar la relevancia e importancia de ésta y asegurar la originalidad. Además, permitirá que otros investigadores consulten las fuentes bibliográficas citadas, pudiendo entender y quizá continuar el trabajo realizado.

2.2.1. Definición del problema

En una revisión bibliográfica previa se determinó que existen escasos documentos que engloben información sobre las isothermas de sorción en alimentos pulverulentos y sus ecuaciones de ajuste. Este hecho, dificulta las tareas de investigación y aplicación de estos datos, siendo éste el problema que la presente investigación pretende resolver.

2.2.2. Organización de la información

Se organizó de manera sistemática la información encontrada en función de las ecuaciones de ajuste más utilizadas, para que de esta forma sea más fácil el acceso a la información y así poder distinguir los documentos principales de los secundarios.

2.2.3. Análisis de la información

Dentro de este apartado se analizaron las ecuaciones de ajuste para isothermas de sorción en alimentos pulverulentos mediante criterios estadísticos, éstos fueron evaluados y analizados críticamente, para ello el principal factor considerado fue el coeficiente de determinación R^2 ; en este sentido las ecuaciones que presentaron valores más próximos a uno, se catalogaron como de mejor ajuste (**Duarte Marques et al., 2020**).

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

Mediante una búsqueda detallada se han encontrado las siguientes investigaciones sobre isotermas de sorción y sus ecuaciones de ajuste en productos alimenticios pulverulentos.

3.1.1. Pulpa de guanábana en polvo

El trabajo realizado por **Barros Cavalcante et al. (2018)**, presenta el comportamiento higroscópico de la pulpa de guanábana en polvo, obtenido mediante un análisis de isotermas de sorción. Dichos valores fueron ajustado a los modelos matemáticos de GAB, BET, Henderson y Oswin, a diferentes temperaturas (25, 30, 35 y 40°C). Para ello, se obtuvo la pulpa de guanábana por secado por atomización a 169°C y un 17% m/m de maltodextrina. Para la determinación de las curvas de sorción se utilizó el método gravimétrico estático, con muestras 0,2 g, analizadas por triplicado durante 13 días.

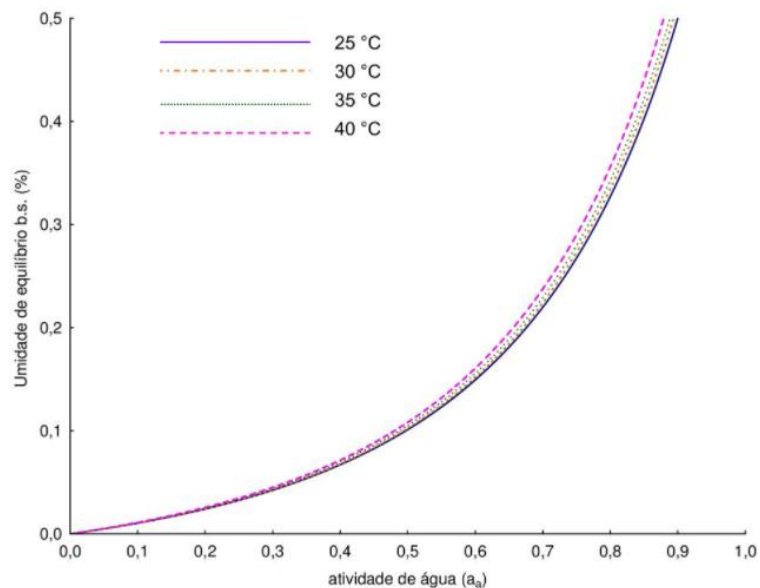


Figura 3. Isotermas de sorción para pulpa de guanábana en polvo

Fuente: Barros Cavalcante et al. (2018).

Las isothermas de sorción obtenidas en el estudio detallado previamente se representan en la Figura 3, cuya tendencia evidencia su comportamiento higroscópico durante el proceso de almacenamiento del producto. Los modelos matemáticos de ajuste utilizados presentan un alto coeficiente de determinación. El modelo matemático descrito por GAB, proporciona un mejor ajuste (coeficiente de determinación igual a 99,9% y porcentaje de error inferior al 5%) (Tabla 2). Además, se evidenció que este producto requiere de un manejo correcto durante el almacenamiento, por lo que se sugiere la utilización de envases que eviten el intercambio de humedad y que las condiciones ambientales no superen el valor de 66% de humedad relativa (**Barros Cavalcante et al., 2018**).

3.1.2. Pulpa de guayaba en polvo

En el trabajo realizado por **Maciel et al. (2020)**, se evaluó el ajuste de modelos matemáticos en las isothermas de sorción de pulpa de guayaba en polvo. Dichos valores se ajustaron a las ecuaciones de GAB, BET, Henderson y Oswin, a temperaturas de 35 y 45°C, aplicando un 4 y 8% de albumina. El estudio fue desarrollado por el método gravimétrico estático, para ello se analizaron muestras del polvo en crisoles bajo un ambiente cerrado y a diferentes valores de humedad relativa.

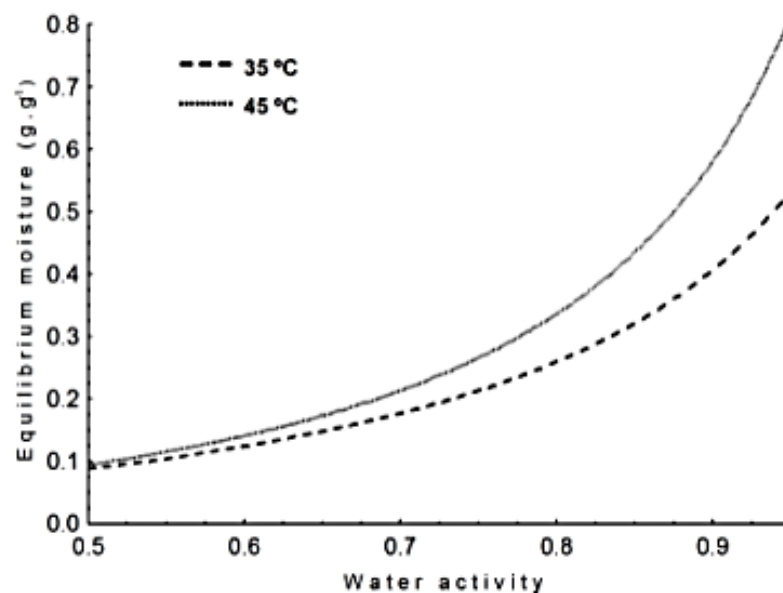


Figura 4. Isothermas de sorción de pulpa de guayaba en polvo con 4% de albúmina

Fuente: Maciel et al. (2020).

El método gravimétrico estático fue utilizado en la investigación debido a que es un método ampliamente utilizado para determinación del comportamiento higroscópico en producto alimenticios (Maciel et al., 2020).

Las Figuras 4 y 5 muestran las isotermas de sorción de la pulpa de guayaba en polvo, con adición del 4 y 8% de albumina, a temperatura de 35 y 45°C. Dentro del estudio realizado, los modelos matemáticos que mejor se ajustan a las isotermas de sorción corresponden a los descritos por GAB, BET, Oswin y Henderson, con un coeficiente de determinación promedio entre las temperaturas evaluadas superior al 99%, con errores relativos por debajo del 8% (Tabla 2), es por ello que, en este caso los cuatro modelos utilizados dentro del estudio se ajustan de buena forma a las isotermas de sorción en ese tipo de producto alimenticio. El estudio realizados por Barros Cavalcante et al. (2018), para pulpa de guanábana, evidencia un comportamiento higroscópico similar, pero con un mejor ajuste en la ecuación de GAB y con un error promedio por debajo del 5%.

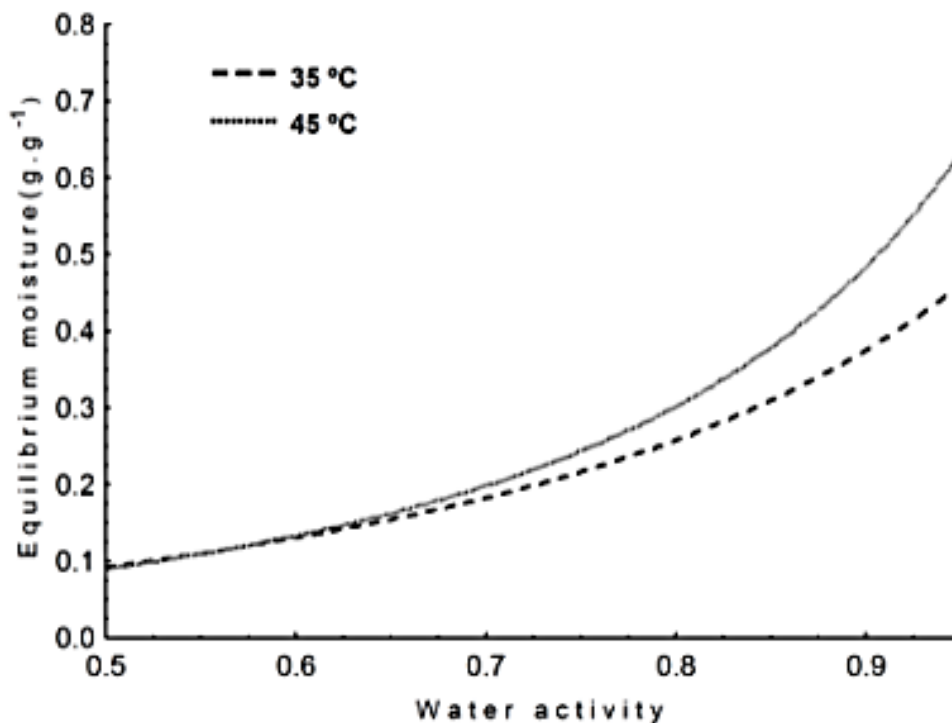


Figura 5. Isotermas de sorción para pulpa de guayaba en polvo con 8% de albumina

Fuente: Maciel et al. (2020)

3.1.3. Pulpa de lulo en polvo

El lulo o “naranjilla” (*Solanum quitoense* var. Castilla), es una fruta nativa de los Andes y es una fuente alta de vitaminas, carbohidratos, proteínas y minerales. Su fruto es de color amarillo dorado, con un diámetro aproximado de entre 2 hasta 6 cm (Cardona et al., 2002; Granados et al., 2013).

En el trabajo descrito por Gabas et al. (2009), se describen las propiedades termodinámicas de sorción de humedad de la pulpa de lulo en polvo. Los datos de la humedad de equilibrio fueron determinados a 20, 30, 40 y 50° C, aplicando además el método estático gravimétrico en rangos de actividad de agua de entre 0,06 a 0,9. Los datos de las isothermas de sorción se ajustaron al modelo matemático descrito por GAB en las diferentes temperaturas evaluadas.

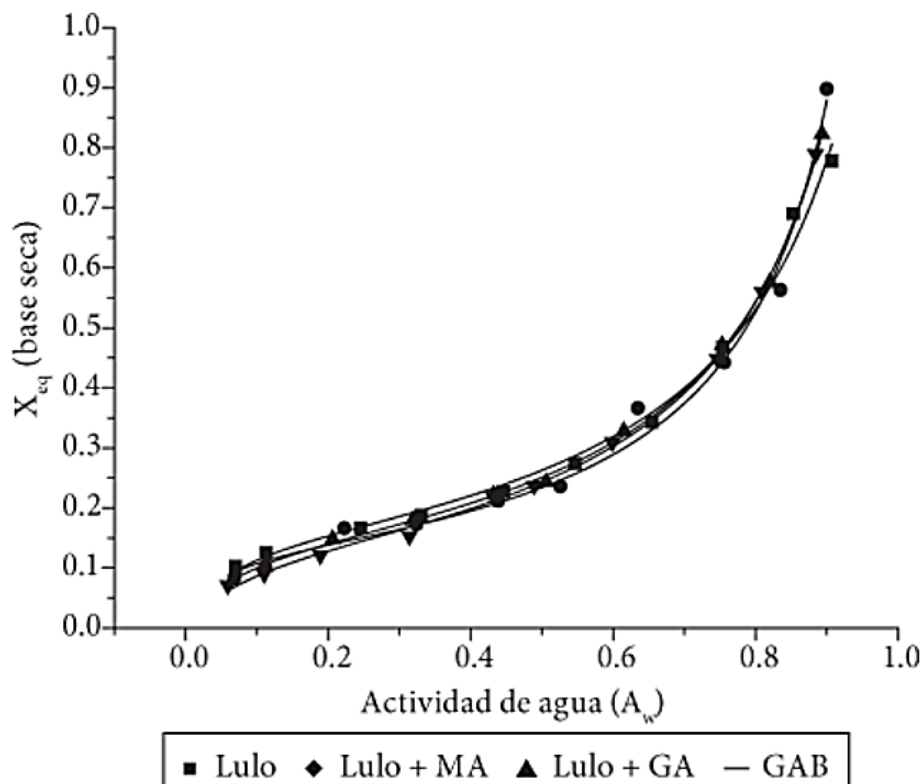


Figura 6. Isoterma de sorción para pulpa de lulo en polvo

Fuente: Gabas et al. (2009)

Los resultados del coeficiente de determinación (R^2) obtenidos del ajuste de las isothermas de sorción para pulpa de lulo en polvo se detallan en la Tabla 2. Se demostró que el mejor ajuste, determinado mediante el coeficiente de determinación, corresponde a 40 y 50°C, alcanzando un valor de 99,9 % en su determinación para ambos casos; mientras que a temperaturas de 20 y 30°C el coeficiente de determinación fue inferior al 99,1%.

3.1.4. Polvo de guanábana

En el estudio realizado por **Machado Baptestini et al. (2020)**, el principal objetivo fue determinar el contenido de humedad en equilibrio higroscópico de pulpa en polvo de guanábana, mediante el ajuste de isothermas de sorción. La metodología utilizada fue el método estático, con un contenido aproximado de 4 g de producto a diferentes temperaturas (10, 20, 30, 40 y 50°C). Los resultados encontrados en la isoterma de adsorción se ajustaron al modelo matemático de GAB y se analizó el coeficiente de determinación R^2 .

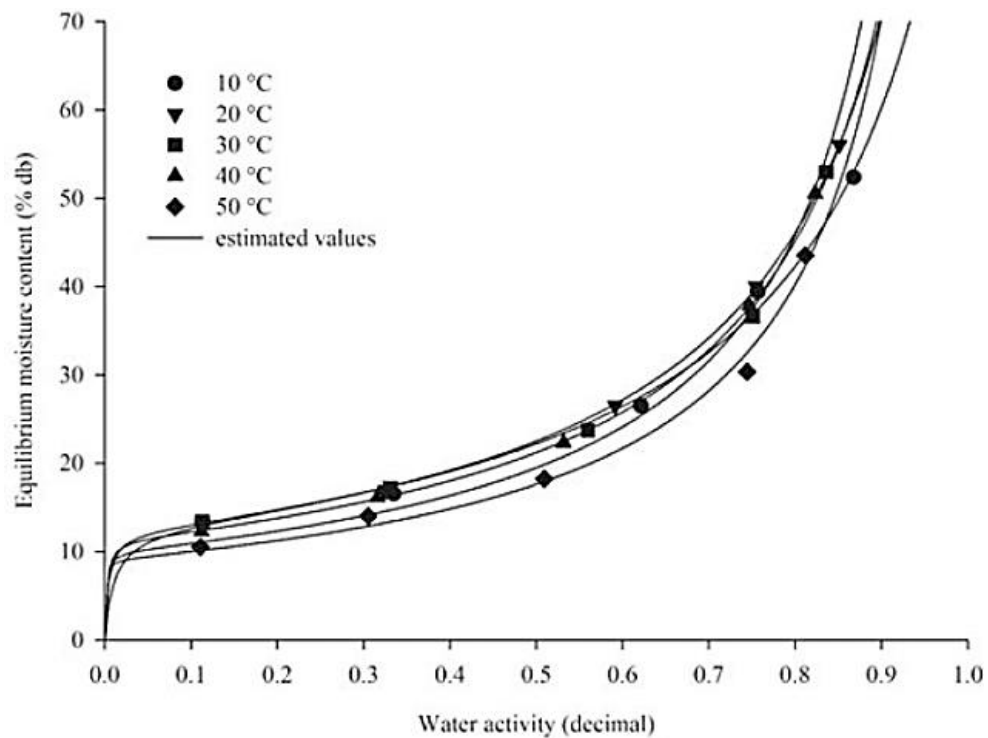


Figura 7. Isothermas de sorción del polvo de guanábana ajustado a modelo de GAB

Fuente: Machado Baptestini et al. (2020)

Las isothermas de sorción de humedad en equilibrio higroscópico para guanábana en polvo se encuentran representadas en la Figura 7. Los coeficientes de determinación del modelo de GAB, ajustados a temperaturas de entre 10 y 50°C, arrojaron valores superiores al 99%. Según los autores la aplicación del modelo de GAB proporciona mayores ventajas frente a otros modelos, debido a que permite un estudio muy profundo de la transferencia de calor que se puede generar durante la sorción de humedad en alimentos; además, este tipo de modelado matemático permite un análisis de las curvas sorción de productos que contengan una actividad de agua de hasta 0,90 (Horta de Oliveira et al., 2017).

3.1.5. Polvo de cajá

El Cajá (*Spondias mombin* L.) es una fruta pequeña con características aromáticas y de forma ovoide, se la puede encontrar en los bosques de México, Perú y Brasil. En el trabajo realizado por Silva Oliveira Gomes et al. (2019), se analizó la humedad en equilibrio de la pulpa de cajá en polvo, mediante la utilización de isothermas de sorción y el ajuste al modelo de GAB. En la obtención de las isothermas de sorción se utilizó el método gravimétrico estático con muestras de 1 g de producto, a diferentes temperaturas (20, 30, 40 y 50°C).

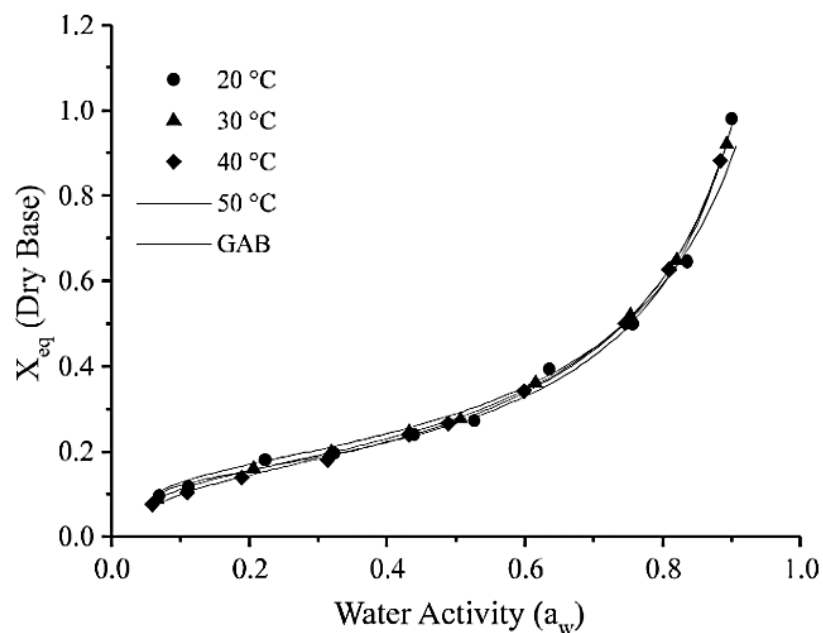


Figura 8. Isothermas de sorción para polvo de cajá

Fuente: Silva Oliveira Gomes et al. (2019)

En la Figura 8 se representan las isotermas de sorción obtenidas para polvo de cajá. En este caso los valores también se ajustaron al modelo descrito por GAB, debido a que es comúnmente utilizado en producto alimenticios. Se obtuvo un valor de 99,9% en el coeficiente de determinación a 40 y 50 °C, y un error máximo del 6%; mientras que para 20 y 30 °C se obtuvieron valores inferiores (Tabla 2). Además, se puede evidenciar en la Figura 8 una isoterma que presenta una forma sigmoidea en su curvatura, que según la clasificación realizada Brunauer, citado por **Labuza y Altunakar (2020b)**, corresponde a una isoterma tipo II.

3.1.6. Pulpa de mangaba liofilizada

La mangaba es un tipo de fruta que se encuentra en Brasil, es rica en nutrientes especialmente en vitamina C y de agradable aroma y sabor (**Ribeiro Soares et al., 2018**). En el trabajo realizado por **Conegero et al. (2017)**, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del polvo de pulpa de mangaba liofilizada con adición de maltodextrina. Para ello se analizaron las propiedades higroscópicas del producto mediante la aplicación de isotermas de sorción y posteriormente se ajustaron los valores a los modelos matemáticos de GAB, BET, Oswin y Henderson, a temperaturas de 25, 30, 35 y 40°C. Las isotermas de sorción se determinaron mediante el método gravimétrico utilizando muestras de 0,2 g y soluciones salinas saturadas de CH₃ a 21±2°C en cámaras de vidrio.

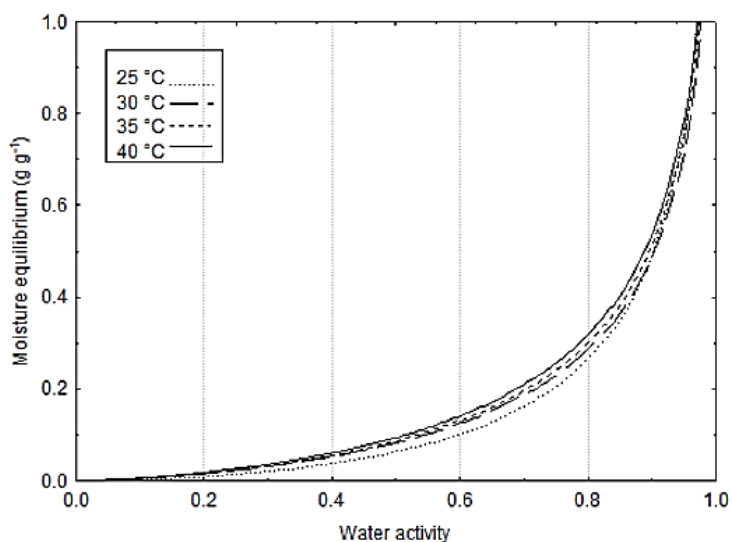


Figura 9. Isotherma de sorción para polvo de pulpa liofilizada de mangaba

Fuente: Conegero et al. (2017)

Las isothermas de sorción que se observan en la Figura 9 representan la humedad en equilibrio con la actividad de agua a temperaturas de 25, 30, 35 y 40 °C. Este tipo de forma, expresada en la isoterma de sorción, suele darse específicamente para polvos amorfos que han sido obtenidos mediante un proceso de liofilización y adición de maltodextrinas (Muzaffar & Kumar, 2016). Por otra parte, la curva de sorción presenta una forma del Tipo III, según la clasificación de (Brunauer et al., 1938); este tipo de curvatura es muy común para alimentos que presenta niveles significativos de compuestos solubles, como es el caso del azúcar.

Así mismo, los resultados del coeficiente de determinación obtenidos de las isothermas de sorción se resumen en la Tabla 2 para los modelos ajustados de BET, GAB, Henderson y Owsin, a temperaturas de entre 25 y 45 °C, con intervalos de 5 °C. Según el coeficiente R^2 analizado, se concluyó que los modelos que presentan mejor ajuste son los de GAB y Henderson, con valores promedios próximos al 100%; mientras que para los modelos restantes el coeficiente de determinación presentó valores inferiores.

3.1.7. Polvo de calabaza con maltodextrina

En el estudio realizado por **Stępień et al. (2020b)**, se analizaron las isotermas de sorción de polvos de calabaza liofilizados con adición de maltodextrina, aplicando métodos de sorción para determinar su comportamiento higroscópico. Las isotermas de sorción se analizaron a una temperatura de 25° C mediante la aplicación del método gravimétrico estático, los datos se ajustaron a modelos matemáticos descritos por BET y GAB, y se compararon los valores de los coeficientes de determinación.

En la Tabla 2 se expresan los resultados obtenidos del coeficiente de determinación R^2 , para un producto bajo concentraciones de 0,5 de polvo y 0,5 de maltodextrina. Al comparar el coeficiente de determinación a la misma concentración y temperatura, se establece que el mejor ajuste corresponde al modelo descrito por GAB, con un coeficiente de determinación del 99,9%, siendo este un indicativo para conocer y analizar el comportamiento de este tipo de producto bajo una temperatura de 25°C.

Según la literatura, la aplicación del modelo de BET da como mejor ajuste cuando los datos de actividad de agua son similares a 0,45 (**R. Andrade et al., 2011**). En este estudio los datos de actividad de agua se delimitaron alrededor de 0,52, mientras que para el modelo de GAB la actividad de agua es igual a 0,75, dando a conocer que este tipo de variaciones hacen que los modelos se ajusten de mejor manera. Además, mediante la clasificación establecida por **Mathlouthi y Rogé (2003)**, las isotermas de sorción corresponden al tipo III, ya que su curvatura de sorción es característico en materiales de bajo peso molecular y con presencia de azúcares o ácidos orgánicos. Un similar comportamiento se observó en el estudio realizado por **Stępień et al. (2020a)**, en polvo de aguacate liofilizado con adición de maltodextrina e inulina.

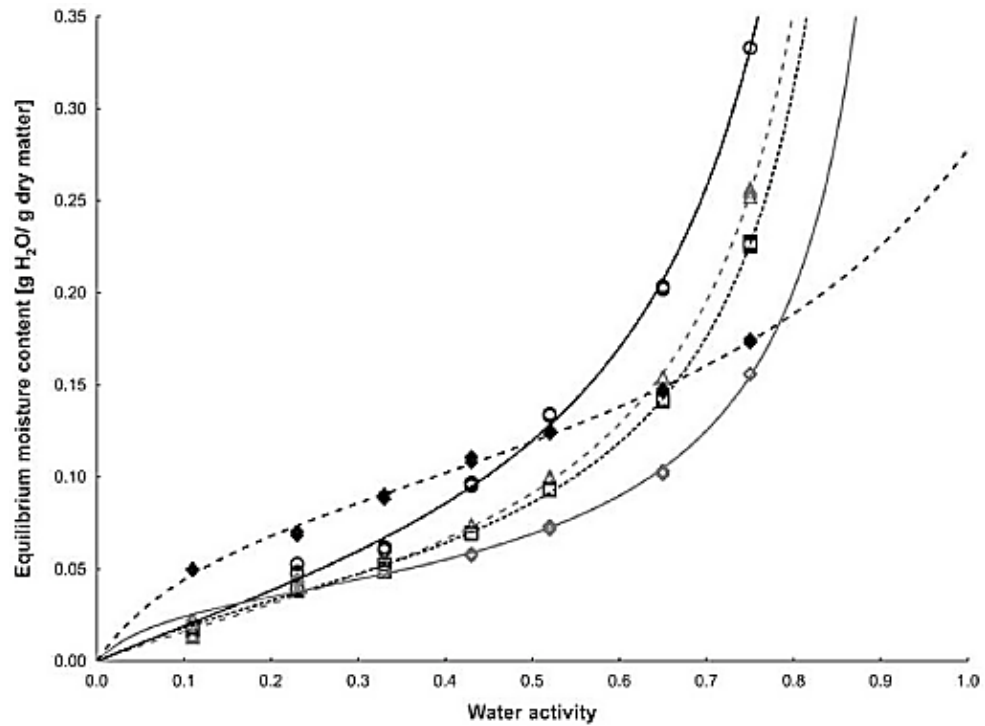


Figura 10. Isoterma de sorción para polvo de calabaza con maltodextrina

Fuente: Stępień et al. (2020b)

3.1.8. Harina de yuca

En el estudio realizado por **A. A. Ayala Aponte (2016)**, se evaluaron las propiedades termodinámicas de sorción en harina de yuca a temperaturas de 25, 30 y 35°C.

Las isotermas de sorción se ajustaron a los modelos matemáticos de GAB, Peleg y Halsey. Para la determinación de las isotermas de sorción se utilizó el método gravimétrico, con el apoyo de un controlador de temperatura Hot Pack. Los parámetros encontrados fueron analizados mediante regresión no lineal.

La isoterma de sorción presentada por parte de los autores del estudio sobre harina de yuca se encuentra representado en la Figura 11, en esta se puede evidenciar que la adsorción de humedad en equilibrio aumenta en función al incremento de la actividad de agua a diferentes temperaturas. Las isotermas presentaron una forma tipo sigmoidea, con

un punto de inflexión a una baja actividad de agua según la clasificación de **Brunauer et al. (1938)** citada por **A. A. Ayala Aponte (2016)**.

En este caso el mejor ajuste presentó el modelo descrito por Peleg, con valores de R^2 superiores a los obtenidos en los modelos de GAB y BET, con un porcentaje promedio de 99,8% a 25, 30 y 35°C. Esto se puede dar debido a que la harina de yuca presenta un menor índice de retención de humedad a temperaturas elevadas, y debido a que existe un mayor nivel humedad, la actividad de agua también aumenta, lo que genera un índice de deterioro alto para el producto (**Jin et al., 2019**). En el estudio desarrollado por **Hawa et al. (2020)**, se pueden observar resultados similares en producto a base de yuca.

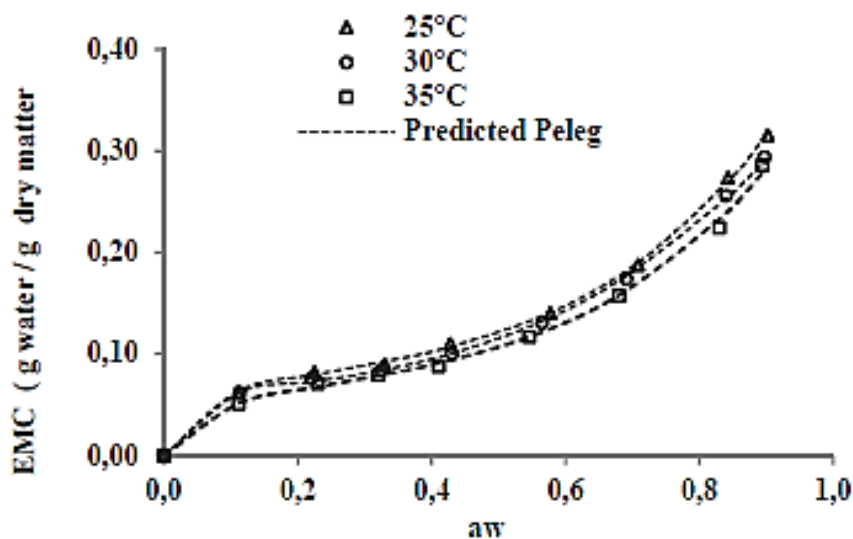


Figura 11. Isoterma de sorción para harina de yuca ajustada al modelo de Peleg

Fuente: A. A. Ayala Aponte (2016)

3.1.9. Harina de Kiwicha variedad Oscar Blanco

Kiwicha (*Amaranthus caudatus.*), es un pseudocereal con un alto valor nutricional, además es rico en proteínas, vitaminas, minerales y fibra dietética (**Martínez Lopez et al., 2020**). En el trabajo realizado por **Choque Quispe et al. (2018)**, se evaluaron las isotermas de sorción de harina de Kiwicha de la variedad Oscar Blanco, mediante el uso del método estático gravimétrico en rangos de humedad relativa de 10 a 90%, a temperaturas de 18, 20, 25 y 30 °C.

Las isothermas de sorción se ajustaron a diferentes modelos matemáticos como GAB, Oswin; Henderson, Halsey y Peleg, los que permiten describir el comportamiento higroscópico del alimento.

En la Figura 12 se encuentran representadas las curvas de sorción de la harina de Kiwicha de la variedad Oscar Blanco. Según la clasificación de curvas de sorción establecidas por **Brunauer et al. (1938)**, se observa que pertenecen al grupo de isothermas del tipo II.

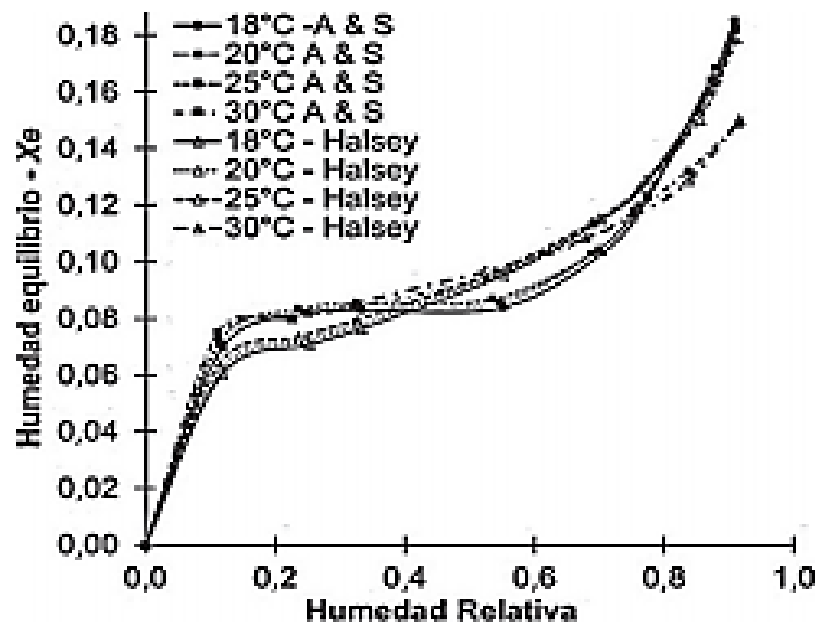


Figura 12. Isotherma de sorción de harina de kiwicha

Fuente: Choque Quispe et al. (2018)

Por otra parte, en la Tabla 2 se describen los resultados del coeficiente de determinación para el ajuste de las isothermas de sorción a diferentes temperaturas. Se evidencia que el modelo matemático de Peleg se ajusta adecuadamente, debido a que alcanza un coeficiente de determinación promedio del 100% a todas las temperaturas de análisis. Mientras que los modelos matemáticos de BET, Oswin, Halsey y Henderson, arrojan valores promedios inferiores al 100%. Así mismo, el estudio realizado por **Pumacahua Ramos et al. (2017)**, demuestra que el modelo de Peleg se ajusta de mejor manera para

harina de kiwicha, con valores elevados del coeficiente de determinación (R^2), con tendencia similar al estudio mencionado en este apartado.

3.1.10. Harina de sorgo cruda y harina de sorgo extruida

En la investigación desarrollada por **Galdeano, Tonon, dos Santos Menezes, et al. (2018)**, se evaluó el comportamiento higroscópico que presenta la harina de sorgo cruda y extruida. Las curvas de sorción según los investigadores fueron obtenidas mediante un método instrumental automatizado con muestras de 3 y 5 mg, a una temperatura de 60°C, bajo condiciones de humedad relativa de entre 11 a 84%. Los resultados analizados en las curvas de sorción se ajustaron al modelo matemático de GAB, presentando un alto porcentaje en el coeficiente de determinación.

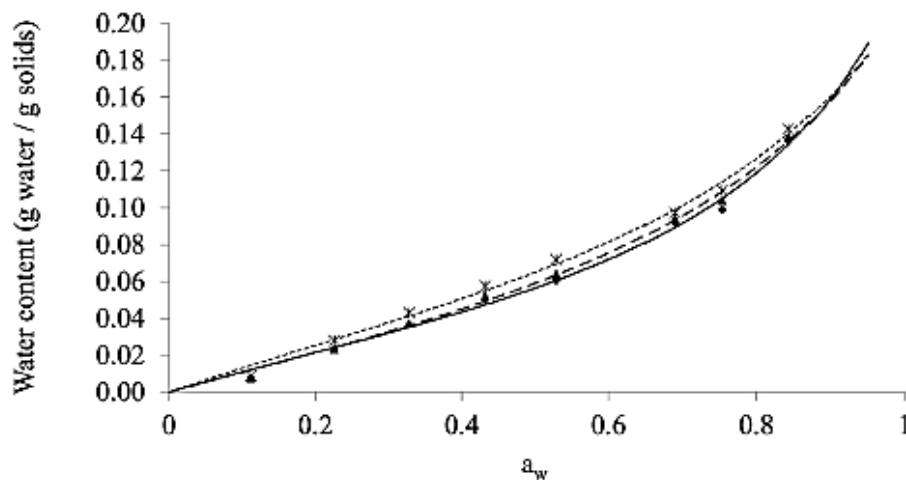


Figura 13. Isoterma de sorción harina de sorgo cruda * y harina de sorgo extruida

Fuente: Galdeano, Tonon, dos Santos Menezes, et al. (2018)

En la Figura 13 se presentan las isotermas de sorción para harina de sorgo cruda y harina de sorgo extruida. Las muestras analizadas evidenciaron una alta adsorción de humedad por parte de la matriz alimentaria, siendo este un comportamiento típico para muestras del tipo hidrofílicas. Además, se observó un incremento proporcional del contenido de humedad en equilibrio en función a la actividad de agua a temperatura constante; este fenómeno puede darse debido a la presencia de proteínas y carbohidratos en el producto.

Los valores obtenidos se ajustaron al modelo matemático descrito por GAB, debido a que este tipo de modelado es aplicado con frecuencia para ajustar rangos de actividad de agua de entre los 0,05 y 0,9 (**Labuza & Altunakar, 2007a**). Mediante el coeficiente de determinación R^2 encontrado en el ajuste, se logró evidenciar que este modelo presenta un ajuste perfecto en el caso de la harina de sorgo extruida y valores por debajo del 99% en la harina de sorgo cruda, bajo condiciones similares de temperatura. Por otra parte, las isotermas de sorción presentan una clasificación sigmoidea del tipo II, que corresponde a productos hidrofílicos (**Sing, 1982**).

3.1.11. Harina de sorgo integral cruda

En el estudio realizado por **Galdeano, Tonon, Piler de Carvalho, et al. (2018)**, se analiza el comportamiento de las isotermas de sorción de harina de sorgo integral cruda. Para su determinación se utilizó el método gravimétrico dinámico y el método de suspensión salina saturada a 60°C, a humedad relativa variable. Las curvas de sorción se ajustaron al modelo matemático de BET para conocer de mejor forma su comportamiento higroscópico.

En la Figura 14 se muestra las isotermas resultantes, mismas que presentan una tendencia sigmoidea correspondiente a la clasificación tipo II (**Brunauer et al., 1938**). Los valores obtenidos mediante el método dinámico tienen concordancia con los resultados arrojados por el método tradicional. Los datos de las isotermas de sorción se ajustaron al modelo de BET y se observó que el método en el que se utilizó la solución salina a 60°C, presentó un mejor ajuste, con un valor de R^2 de 99,3, superior al arrojado por el método dinámico.

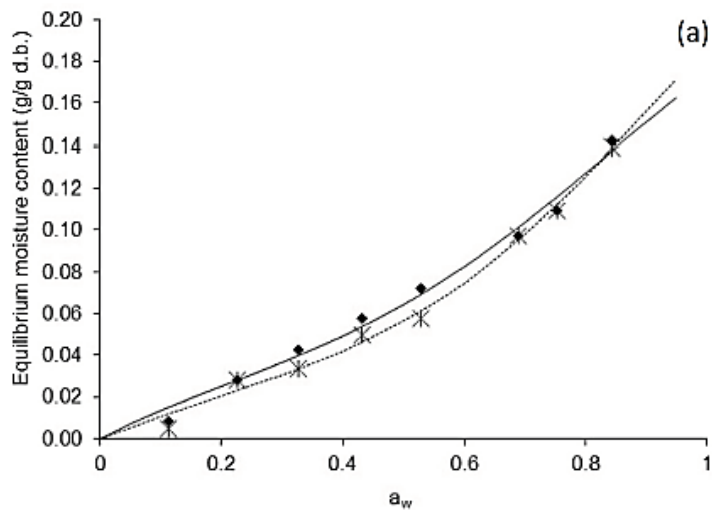


Figura 14. Isoterma de sorción de humedad para harina de sorgo integral cruda
Fuente: Galdeano, Tonon, Piler de Carvalho, et al. (2018)

3.1.12. Almidón de quinua

Pumacahua Ramos et al. (2017), evaluaron el comportamiento del almidón de quinua en función de la humedad relativa y la temperatura; para ello construyeron las isotermas de sorción a temperaturas de entre 20 a 60°C, a intervalos de 10°C. Dichos valores se ajustaron a los modelos matemáticos de GAB, Oswin, Henderson, Peleg y Ferro-Foltan. El método utilizado en la determinación de las isotermas fue el gravímetro estático.

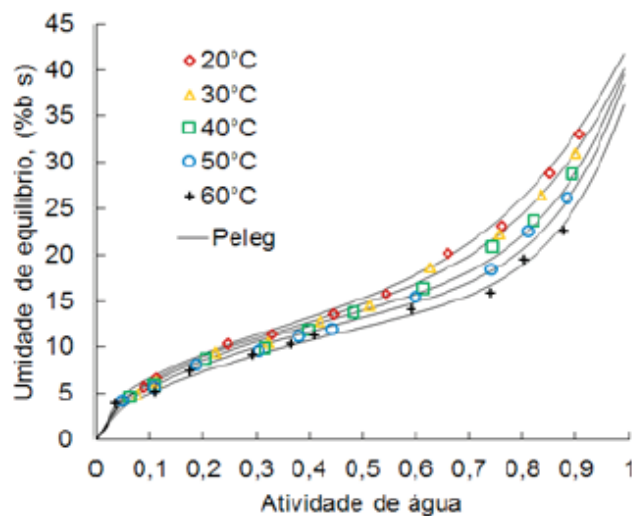


Figura 15. Isoterma de sorción para almidón de quinua ajustado al modelo de Peleg
Fuente: Pumacahua Ramos et al. (2017).

En la Figura 15 se presentan las isotermas de sorción para almidón de quinua, mismas que presentaron una forma sigmoidea del tipo II, según la clasificación de **Brunauer et al. (1938)**. Las isotermas de sorción se ajustaron a varios modelos matemáticos con el fin de determinar el más adecuado; en la Tabla 2 se resumen los valores del coeficiente de determinación y se demostró que el modelo matemático descrito por Peleg presenta valores superiores del coeficiente de determinación (99,62%), frente a los modelos de GAB, Oswin, Henderson y Ferro-Foltan.

3.1.13. Leche en polvo

La investigación desarrollada por **Zhong et al. (2017)**, se centró en la evaluación del calentamiento por radiofrecuencia, en la rehidratación de leche en polvo a 90°C. Se analizaron tres tipos de muestras: control, sometida a un proceso de calentamiento por 5 y 10 minutos. Los datos encontrados se ajustaron al modelo matemático de GAB.

En la Figura 16 se representa la isoterma de sorción de leche en polvo, mismas que presentaron una forma sigmoidea del tipo II. Además, no se observó diferencia significativa entre el control y las otras dos muestras analizadas. En cuanto al ajuste matemático, se observaron valores superiores en la muestra calentada durante 5 minutos por radiofrecuencia, con un valor aproximado de 97,32% (Tabla 2), mientras que para la muestra control y con calentamiento de 10 minutos, el R^2 fue inferior.

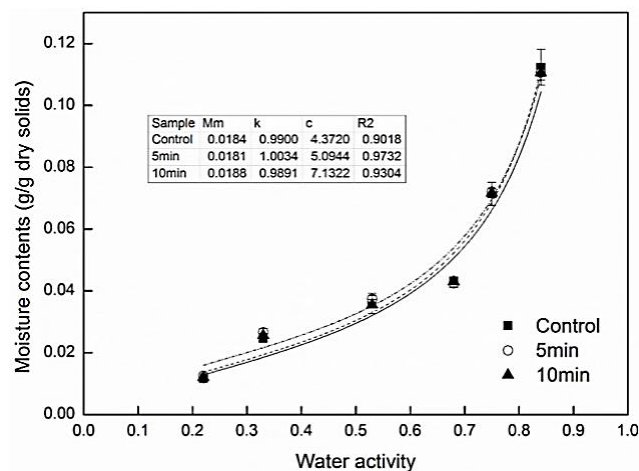


Figura 16. Isoterma de sorción de leche en polvo antes y después de la rehidratación

Fuente: Zhong et al. (2017)

3.1.14. Café molido

Machado Baptestini et al. (2017), reportaron el modelo cinético de sorción en café molido. Las isotermas de sorción analizadas se ajustaron a los modelos matemático de Oswin, Halsey y GAB, bajo combinaciones de humedad relativa y temperatura de almacenamiento de 25 y 30°C. Para la determinación se usó el método estático y dinámico, con el uso de cámaras de Demanda Biológica de Oxígeno, soluciones saturadas de cloruro de magnesio y carbonato de potasio y muestras de 10 g.

Las isotermas de sorción para café molido a 20 y 30°C se representan en las Figura 17 y 18, respectivamente. Los resultados correspondientes al coeficiente de determinación en los modelos de ajuste de GAB, Oswin y Halsey presentan valores superiores al 95%. El modelo descrito por GAB presenta un mayor ajuste frente a los demás modelos estudiados. El estudio realizado por **Corrêa et al. (2016)**, corrobora la tendencia descrita en el estudio discutido previamente. Es importante señalar que dentro del estudio en mención se logró evidenciar que, al aumentar la temperatura hasta alcanzar una actividad de agua constante, se produce una reducción de la humedad de equilibrio en el producto.

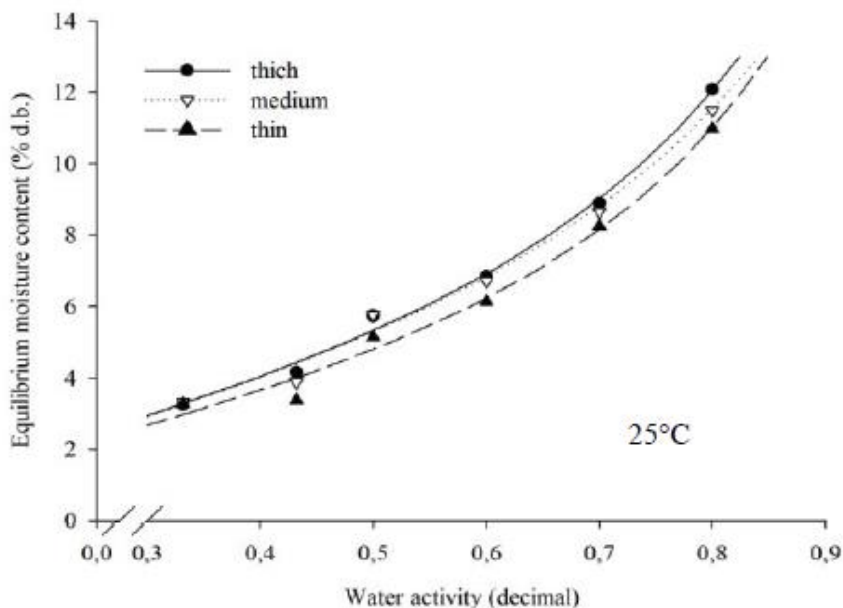


Figura 17. Isoterma de sorción de humedad para café molido a 25°C.

Fuente: Machado Baptestini et al. (2017)

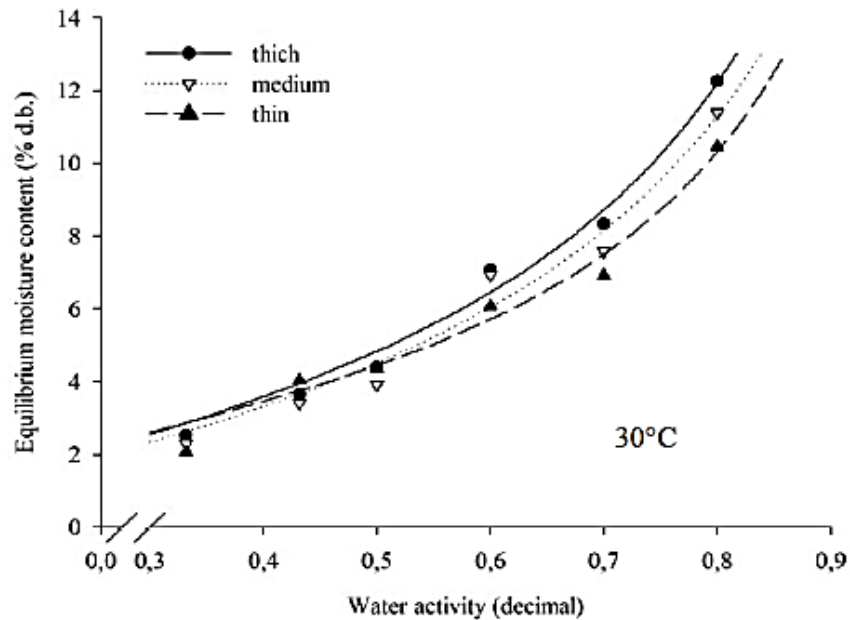


Figura 18. Isoterma de sorción de humedad para café molido a 30°C

Fuente: Machado Baptestini et al. (2017)

3.1.15. Condimento en polvo con Tucupi

El Tucupi es un condimento que se obtiene mediante la fermentación de la yuca y que se consume generalmente como ingrediente en la preparación de diferentes platillos locales en la región del norte de Brasil (**dos Santos Costa et al., 2017; Seabra Pires & da Silva Pena, 2017**);, evaluaron el comportamiento higroscópico de muestras de 500 mg de Tucupi en polvo, mediante la aplicación de isotermas de sorción obtenidas utilizando el método de sorción dinámica de vapor a 25°C y un analizador de absorción de vapor programado para obtener curvas tanto de adsorción, como de desorción. Finalmente, los datos experimentales recogidos se ajustaron a los modelos matemáticos de Helsey, Henderson, Kuhn, Mizeahi, Owsin, Ferro-Fontan, GAB y Peleg.

La isoterma de sorción a 25°C para el Tucupi en polvo se presenta en la Figura 19 y los datos del coeficiente de determinación se encuentran resumidos en la Tabla 2. El modelo matemático de Peleg es el que mejor se ajusta a las isotermas de sorción presentadas por este producto, con un r^2 de 99,6%; mientras que las isotermas de desorción se ajustan al modelo de GAB, presentando un coeficiente de determinación más alto (99,7%).

Según **Costa et al. (2017)**, el modelo de Peleg es el único capaz de predecir con mayor precisión estadística las isothermas de sorción y desorción. Por otra parte, las isothermas de adsorción se clasifican según su forma como de tipo II, mientras que las isothermas de desorción como del Tipo III (**Labuza & Altunakar, 2020**).

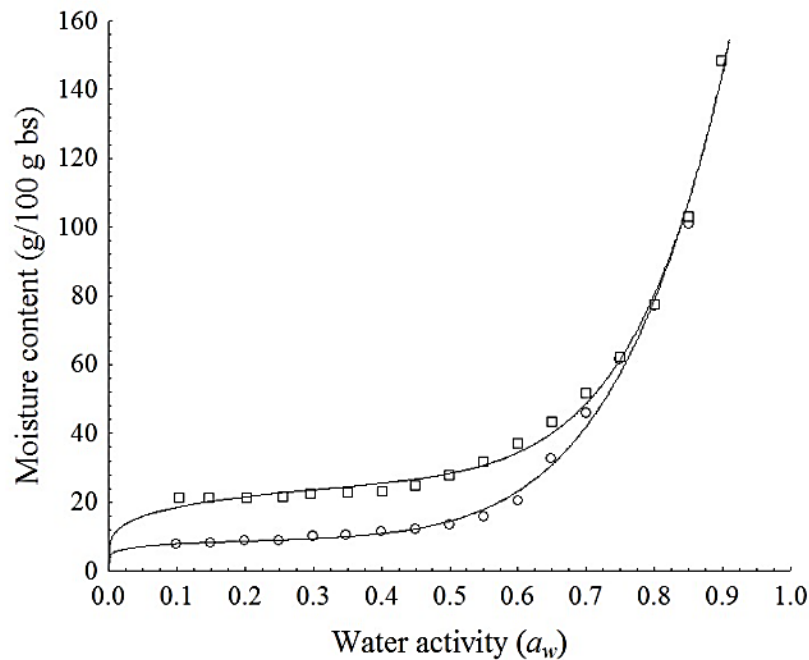


Figura 19. Isothermas de adsorción y desorción de Tucupi en polvo

Fuente: Costa et al. (2017)

3.2. Contraste de los resultados obtenidos en las diferentes fuentes bibliográficas

La actividad de agua dentro de un alimento funciona como parámetro indicativo para determinar la disponibilidad de agua dentro de una matriz, resultando importante para el análisis del procesamiento alimentario y sobre todo para predecir la vida de anaquel de los productos (**Gil et al., 2016**). Desde este punto de vista tecnológico, la recopilación de información del comportamiento de las isothermas de sorción en alimento pulverulentos, provee información interesante que puede ser utilizada en diferentes procesos alimentarios como el secado, mezclado, envasado y almacenado.

En la Tabla 2 se detallan de forma resumida los diferentes estudios discutidos previamente, así como las condiciones de determinación de las isothermas de sorción (temperatura, humedad relativa y concentración) y el coeficiente de determinación (r^2), para los modelos de ajuste más utilizados. Cabe mencionar que cada uno de los estudios revisados presentan datos establecidos por los autores, dando a conocer que el valor del coeficiente de determinación va a depender de la cantidad de datos con los que se realice el estudio.

Para todos los modelos matemáticos ajustados el coeficiente de determinación presenta valores superiores al 90%. Los modelos de BET y GAB son los más utilizados en la ciencia de alimentos. En el caso del modelo de BET se debe a que refleja un mejor ajuste en una amplia gama de alimentos, mientras que al analizar el modelo de GAB se debe a que permite realizar ajustes hasta una actividad de agua de 0.9. De manera general, se observa un mejor ajuste al utilizar el modelo matemáticos de GAB, debido a que permite predecir de mejor manera el comportamiento higroscópico de los productos alimenticios (**Horta de Oliveira et al., 2017**).

Por otra parte, en la Tabla 3 se reporta el porcentaje de error calculado. Se puede notar que este parámetro depende del tipo de alimento, de las condiciones de determinación y del modelo matemático utilizado.

Finalmente, la mayoría de curvas de sorción observadas en los alimentos pulverulentos reportados previamente (harina de kiwicha y sorgo, almidón de quinua, leche en polvo, condimento de tucupi), se clasifican según su forma como de tipo II según la clasificación de Brunauer; es decir, presentan un punto de inflexión a valores de actividad de agua bajos y una tendencia asintótica a valores altos (**A. Ayala Aponte, 2011**). Este tipo de isoterma se ha reportado en alimentos con alto contenido de almidón, como maíz (**Vega-Galvez et al., 2006**), papa (**McMinn & Magee, 2003**) y en alimentos elaborados a base de yuca (**Ikhu-Omoregbe, 2006**).

Sin embargo, también se observan curvaturas del tipo III, especialmente en aquellos alimentos que presentan niveles significativos de compuestos solubles (azúcares), como es el caso de la pulpa en polvo de cajá, manga y calabaza (**Costa et al., 2017**).

Tabla 2. Resultados encontrados en ecuaciones de ajuste para isotermas de sorción en alimentos pulverulentos mediante el coeficiente de determinación r^2

Modelado	Temperatura °C	Coeficiente de determinación R^2										Fuente
		GAB	BET	Henderson	Oswin	Halsey	Kuhn	Mizrahi	Ferro-Foltan	Peleg	Caurie	
Pulpa de guanábana en polvo	25	99,9	99,9	99,8	99,1	-	-	-	-	-	-	(Barros Cavalcante et al., 2018)
	30	99,8	99,9	99,8	99	-	-	-	-	-	-	
	35	99,9	99,9	99,8	99,2	-	-	-	-	-	-	
	40	99,9	99,9	99,8	99,2	-	-	-	-	-	-	
Pulpa de guayaba en polvo	+ 4% albumina	35	99,6	98,7	99,6	99,1	-	-	-	-	-	(Maciel et al., 2020)
		45	99,5	99,4	99,4	99,2	-	-	-	-	-	
	+ 8% albumina	35	99,3	98,7	99,3	98,3	-	-	-	-	-	
		45	99,7	99,3	99,5	99,5	-	-	-	-	-	
Pulpa de lulo en polvo	20	99,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Gabas et al., 2009)
	30	98,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	40	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	50	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Polvo de guanábana	10-50	>99%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Machado Baptestini et al., 2020)
Polvo de Cajá	20	99,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Silva Oliveira Gomes et al., 2019)
	30	99,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	40	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	50	99,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Polvo de pulpa liofilizada de mangaba	25	99,7	99,5	99,7	99,6	-	-	-	-	-	-	(Conegero et al., 2017)
	30	99,9	99,3	99,9	99,6	-	-	-	-	-	-	
	35	99,9	99,4	99,9	99,6	-	-	-	-	-	-	
	40	99,8	99,7	99,9	99,8	-	-	-	-	-	-	
Polvo de calabaza con maltodextrina [Polvo 0,5 y maltodextrina 0,5]	25	99,9	99,4	-	-	-	-	-	-	-	-	(Stepień et al., 2020b)
Harina de yuca	25	99,3	-	-	-	98,6	-	-	-	99,9	-	(A. A. Ayala Aponte, 2016)
	30	99,7	-	-	-	98,8	-	-	-	99,9	-	
	35	99,57	-	-	-	99,2	-	-	-	99,6	-	

Tabla 2. Resultados encontrados en ecuaciones de ajuste para isotermas de sorción en alimentos pulverulentos mediante el coeficiente de determinación r^2 (continuación)

Harina de Kiwicha variedad Oscar Blanco	18	86	-	80	90	92	-	-	-	100	82	(Choque Quispe et al., 2018)	
	20	79	-	81	81	94	-	-	-	100	72		
	25	92	-	85	93	97	-	-	-	100	87		
	30	94	-	89	93	89	-	-	-	96	92		
Harina de sorgo cruda	60	99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Galdeano, Tonon, dos Santos Menezes, et al., 2018)	
Harina de sorgo extruida	60	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Harina de sorgo integral cruda	60 Solución salina		99,3	-	-	-	-	-	-	-	-	(Galdeano, Tonon, Piler de Carvalho, et al., 2018)	
	60 Dinámico		98,9	-	-	-	-	-	-	-	-		
Almidón de quinua	20	99,9	-	99	99,5	-	-	-	99,5	99,8	-	(Pumacahua Ramos et al., 2017)	
	30	99,8	-	99,2	99,5	-	-	-	99,4	99,7	-		
	40	99,8	-	99,1	99,7	-	-	-	99,5	99,6	-		
	50	99,7	-	98,9	99,7	-	-	-	99,3	99,5	-		
	60	98,9	-	98,8	99,1	-	-	-	98,4	99,5	-		
Leche en polvo	90 control	90,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Zhong et al., 2017)	
	90 calenta. 5 min	97,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	90 calenta. 10 min	93,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Café molido	25	97,9	-	-	96,4	95,9	-	-	-	-	-	(Machado Baptistini et al., 2017)	
	30	94,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Condimento en polvo con Tucupi	25		99,0	-	98,7	98,6	98,3	98,5	98,6	99,2	99,6	-	(Costa et al., 2017)
			99,7	-	92,3	96,7	98,7	99,5	99,6	99,1	99,6	-	

Tabla 3. Resultados del porcentaje de error para el cálculo matemáticos de las ecuaciones de ajuste para isothermas de sorción en alimentos pulverulentos

Modelado		Temperatura °C	Porcentaje de Error									Fuente		
			GAB	BET	Henderson	Oswin	Halsey	Kuhn	Mizrahi	Ferro-Foltan	Peleg		Caurie	
Alimento														
Pulpa de guanábana en polvo		25	2,97	5,22	4,27	13,24	-	-	-	-	-	-	(Barros Cavalcante et al., 2018)	
		30	0,58	5,96	6,18	9,03	-	-	-	-	-	-		
		35	1,84	5,25	4,18	12,06	-	-	-	-	-	-		
		40	4,47	4,27	1,35	3,74	-	-	-	-	-	-		
Pulpa de guayaba en polvo + 4% albumina		35	6,45	10,5	4,93	11,76	-	-	-	-	-	-	(Maciel et al., 2020)	
		45	7,64	8,43	9,38	7,01	-	-	-	-	-	-		
		+ 8% albumina		35	7,73	8,41	8,16	15,93	-	-	-	-		-
		45	6,31	8,97	7,89	5,45	-	-	-	-	-	-		
Pulpa de lulo en polvo		20	0,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Gabas et al., 2009)	
		30	0,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		40	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		50	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Polvo de guanábana		10-50	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-	(Machado Baptestini et al., 2020)		
Polvo de Cajá		20	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-	(Silva Oliveira Gomes et al., 2019)		
		30	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-			
		40	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-			
		50	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-			
Polvo de pulpa liofilizada de mangaba		25	11,44	16,88	9,70	17,86	-	-	-	-	-	(Conegero et al., 2017)		
		30	12,07	20,53	9,70	17,93	-	-	-	-	-			
		35	10,43	20,55	7,85	20,16	-	-	-	-	-			
		40	8,04	14,24	5,76	15,79	-	-	-	-	-			

Tabla 3. Resultados del porcentaje de error para el cálculo matemáticos de las ecuaciones de ajuste para isothermas de sorción en alimentos pulverulentos (continuación)

Harina de yuca	25	5,15	-	-	-	3,33	-	-	-	1,51	25	(A. A. Ayala Aponte, 2016)
	30	5,88	-	-	-	3,21	-	-	-	1,72	30	
	35	3,16	-	-	-	4,13	-	-	-	2,52	35	
Harina de Kiwicha variedad Oscar Blanco	18	7,70	-	8,90	7,20	6,30	-	-	-	0,70	8,50	(Choque Quispe et al., 2018)
	20	10,0	-	12,80	9,70	7,20	-	-	-	3,90	12,20	
	25	6,00	-	7,50	5,30	3,60	-	-	-	0,50	6,90	
	30	4,80	-	7,30	5,50	4,50	-	-	-	4,30	6,20	
Almidón de quinua	20	3,75	-	5,80	4,36	-	-	-	5,24	3,79	-	(Pumacahua Ramos et al., 2017)
	30	2,59	-	4,56	5,67	-	-	-	7,43	4,09	-	
	40	3,44	-	4,96	5,11	-	-	-	1,34	3,49	-	
	50	5,74	-	5,39	5,18	-	-	-	7,21	3,56	-	
	60	11,90	-	5,08	5,18	-	-	-	8,32	5,40	-	
Café molido	25	7,13	-	-	8,64	9,66	-	-	-	-	-	(Machado Baptistini et al., 2017)
	30	10,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Condimento en polvo con Tucupi	25	3,9	-	4,4	4,6	5,1	4,8	4,6	3,6	2,5	-	(Costa et al., 2017)
		2,0	-	9,6	6,2	3,9	2,3	2,1	3,3	2,3	-	

3.3. Propuesta de usos de la información recopilada en la producción alimentaria

La industria de los alimentos es uno de los ejes económicos estratégicos, debido a que los alimentos forman parte del sector de primera necesidad, por lo que esta investigación se centra en recopilar información a disposición y beneficio de la industria alimentaria.

En el ámbito del procesamiento alimentario las isotermas de sorción permiten evidenciar la relación termodinámica entre la humedad relativa en equilibrio y la actividad de agua a presión y temperatura constante. Esta relación es importante dentro de la ingeniería alimentaria, debido a que permite diseñar y optimizar procesos de secado, envasado, control de calidad, estabilidad y en la evaluación de la vida útil de los alimentos (**Alvarado Yupanqui et al., 2020; Deusa Alonso, 2019**).

Según **Becerra Cuba (2016)**, el uso de las isotermas de sorción en la producción alimentaria aporta información para considerar una mejor tecnología de conservación de alimentos y conocer si la matriz alimentaria se considera un material altamente higroscópico (**Reyes López et al., 2017**). Además, las isotermas funcionan como una herramienta básica que permite conocer de mejor manera un producto y sobre todo optimizar los empaques y embalajes a utilizar, simplemente evaluando aquellos materiales que disminuyen la interacción del agua presente en la matriz alimentaria y la que se encuentra en el entorno.

Así mismo, las isotermas de sorción ilustran la cantidad de agua retenida por los sólidos en los alimentos; es decir, el porcentaje de humedad relativa de almacenamiento a temperatura constante, es por ello que para la industria de los alimentos estas curvas proporcionan un análisis científico sobre la estabilidad de los alimentos (**Bell, 2020**) y a su vez un análisis cuantitativo del proceso de sorción para predecir la vida de anaquel bajo condiciones específicas de almacenamiento (**García Ramón, 2021; Labuza & Altunakar, 2020**).

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- De todos los modelos matemáticos analizados (GAB, BET, Henderson, Oswin, Halsey, Kuhn, Mizrahi, Ferro-Foltan, Peleg y Caurie), en la mayoría de los productos pulverulentos, se obtienen mayores valores del coeficiente de determinación y menores porcentajes de error al trabajar con el modelo de GAB.
- Dependiendo de las condiciones de almacenamiento y el ambiente en el que se desarrolla el análisis, va a existir variación en el ajuste de los modelos matemáticos, por lo que el modelo matemático de GAB es el más recomendado para ajustar datos de sorción de productos alimenticios pulverulentos, debido a que permite trabajar en condiciones más extensas de actividad de agua.

4.2. Recomendaciones

- Desarrollar proyecto de investigación y titulación que vinculen los datos sobre isotermas de sorción y la optimización de empaques y embalajes que disminuyan la interacción del agua presente en la matriz alimentaria y la que se encuentra en el entorno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, S., Keoh, S., Johar, H., Razak, N., Shaari, A., & Rukunudin, I. (2020). *Mathematical modelling of moisture sorption isotherms by using BET and GAB models*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Al Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A., & Magee, T. R. (2004). Water sorption isotherms of starch powders: Part 1: Mathematical description of experimental data. *Journal of food Engineering*, 61(3), 297-307.
- Alvarado, J. d. D. (2014). *Principios de Ingeniería Aplicados en Alimentos (2da. ed.)* (Segunda Edición ed.).
- Alvarado Yupanqui, L., Claudio Miano, A., & Barraza Jáuregui, G. (2020). Sorption Isotherm and Shelf Life of Malted Quinoa Flour. *LACCI*, 18.
- Andrade, E. T., Figueira, V. G., Teixeira, L. P., Taveira, J. H., & Borém, F. M. (2017). Determination of the hygroscopic equilibrium and isosteric heat of aji chili pepper. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(12), 865-871.
- Andrade, R., Lemus, R., & Pérez, C. (2011). Models of sorption isotherms for food: uses and limitations. *Vitae*, 18(3), 325-334.
- Anria, M., González, A., & Quintero, R. (2019). Modelado de la isoterma de adsorción de zanahorias deshidratadas. *Revista I+D Tecnológico*, 15(1), 17-23.
- Ayala Aponte, A. (2011). Estimación de las isotermas de adsorción y del calor isostérico en harina de yuca. *Biotecnología en el Sector agropecuario y agroindustrial*, 9(1), 88-96.
- Ayala Aponte, A. A. (2016). Thermodynamic properties of moisture sorption in cassava flour. *Dyna*, 83(197), 138-144.

- Bahammou, Y., Moussaoui, H., Lamsayeh, H., Tagnamas, Z., Kouhila, M., Ouaabou, R., . . . Idlimam, A. (2020). Water sorption isotherms and drying characteristics of rupturewort (*Herniaria hirsuta*) during a convective solar drying for a better conservation. *Solar Energy*, 201, 916-926.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.071>
- Barros Cavalcante, C., Rodrigues, S., Amorim Afonso, M., & Correia Costa, J. (2018). Comportamento higroscópico da polpa de graviola em pó obtida por secagem em spray dryer. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21.
- Becerra Cuba, E. (2016). *Agua y actividad de agua: sustentación para optar el título profesional de ingeniera de industrias alimentarias bajo la modalidad de suficiencia profesional*. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa Perú.
- Bell, L. N. (2020). Moisture Effects on Food's Chemical Stability. In *Water Activity in Foods* (pp. 227-253).
- Bohorquez, C., García, O., Sánchez, T., & Pinzón, M. (2016). Isotermas de sorción de almendras de café de cuatro orígenes almacenadas en dos tipos de empaque. *Alimentos Hoy*, 24(39), 85-91.
- Brousse, M., Linares, R., Vergara, M., & Nieto, A. (2017). Adsorption isotherm of dehydrated mashed cassava from different varieties. *Revista de Ciencia y Tecnología*(No.28), 29-37.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319. doi:10.1021/ja01269a023
- Bustos Vanegas, J., Corrêa, P., Zeymer, J., Baptestini, F., & Campos, R. (2018). Moisture sorption isotherms of quinoa seeds: thermodynamic analysis. *Engenharia agrícola*, 38(6), 941-950.

- Cardona, P., Cifuentes, Q., & Pinzón, F. (2002). *Evolución de pulpa de lulo la selva almacenada en temperatura de refrigeración y congelación.*
- Choque Quispe, D., Ligarda Samanez, C., Ramos Pacheco, B., Taipe Pardo, F., Peralta Guevara, D., & Solano Reynoso, A. (2018). Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) Evaluation of sorption isotherms of grains and flour of amaranth (*Amaranthus caudatus*) Avaliação das isotermas de sorção de grãos. *ion*, 31.
- Collazo Abreu, P. L., Morejón Mesa, Y., Fernández Chuairey, L., & Vázquez Alfonso, Y. (2018). Modelos matemáticos y experimentales para el análisis del secado solar de semillas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(1), 89-98.
- Conegero, J., Ribeiro, L. C., Monteiro, A. R., & da Costa, J. M. (2017). Hygroscopic trend of lyophilized ‘mangaba’ pulp powder. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(5), 356-360.
- Corrêa, P. C., Horta de Oliveira, G. H., Lelis Rodrigues, A. P., Vargas Elías, G. A., & Machado Baptestini, F. (2016). Particle size and roasting on water sorption in conilon coffee during storage. *Acta Scientiarum. Agronomy*.
- Costa, T. d. S., Carmo, J. R. d., & Pena, R. d. S. (2017). Powdered tucupi condiment: sensory and hygroscopic evaluation. *Food Science Technology*, 38, 33-40.
- de Sousa, K. A., Resende, O., & Carvalho, B. d. S. (2016). Determinação das isotermas de dessorção, calor latente e calor isostérico de diásporos de pequi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(5), 493-498.
- Deusa Alonso, J. (2019). *Obtención de las isotermas de sorción de pollo a temperaturas de congelación.* Recuperado de <http://hdl.handle.net/10251/126447>
- dos Santos Costa, T., Rodrigues do Carmo, J., Calandrini Braga, A. C., & da Silva Pena, R. (2017). Tucupi creamy paste: development, sensory evaluation and

rheological characterization. *Food Science Technology*, 37, 115-124.
doi:doi.org/10.1590/1678-457X.34516

Duarte Marques, R. C. R. O., Érica, Mendes Coutinho, G. S. C. R., Alline Emannuele Souza Teixeira, Camila, Soares Soares, M., & Caliari, M. (2020). Modeling sorption properties of maize by-products obtained using the Dynamic Dewpoint Isotherm (DDI) method. *Food Bioscience*, 38, 100738.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100738>

Estrada, E., Cortés, M., & Gil, J. (2017). Guacamole powder: standardization of the spray drying process. *Vitae*, 24(2), 102-112.

Felicetti, M. A., Correa Junior, J. d. S., & Rodrigues, M. K. (2020). Interações partícula-superfície em processos industriais. *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 30490-30497.

Gabas, A. L., Telis Romero, J., Giraldo Gómez, G. I., & Nicoletti Telis, V. R. (2009). Propriedades termodinâmicas de sorção de água de polpa de lulo em pó com encapsulantes. *Food Science Technology*, 29(4), 911-918.

Galdeano, M. C., Tonon, R. V., dos Santos Menezes, N., Piler de Carvalho, C. W., da Silva Minguita, A. P., & da Costa Mattos, M. d. C. (2018). Influence of milling and extrusion on the sorption properties of sorghum. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21.

Galdeano, M. C., Tonon, R. V., Piler de Carvalho, C. W., Menezes, N. S., Nogueira, R. I., Leal, W. F., & Silva Minguita, A. P. (2018). Moisture sorption isotherms of raw and extruded wholemeal sorghum flours studied by the dynamic and salt slurry methods. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21.

García Ramón, D. F. (2021). *Determinación de la vida útil del pan de molde libre de gluten con quinua (Chenopodium quinoa)*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Peru.

- Gil, J., Yacanto, P., Muratona, S., Abaca, C. R., & Esquenoni, S. M. (2016). Influencia de la composición de la leche en polvo sobre la actividad de agua aplicando el modelo de GAB. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 7(1), 41-47.
- Granados, C., Torrenegra, M. E., Acevedo, D., & Romero, P. (2013). Evaluación fisicoquímica y microbiológica del aperitivo vínico de lulo (*Solanum quitoense* L.). *Información tecnológica*, 24(6), 35-40.
- Guzmán Hincapié, J., & Zapata, J. (2018). Propiedades termodinámicas e isothermas de sorción de sales con interés alimentario. *Información tecnológica*, 29(3), 105-120.
- Hawa, L. C., Ubaidillah, U., Damayanti, R., & Hendrawan, Y. (2020). Moisture sorption isotherms of modified cassava flour during drying and storage. *Heat and Mass Transfer*, 56(8), 2389-2396. doi:10.1007/s00231-020-02866-1
- Hincapié Mejía, G., Cardona Cuervo, S., & Ríos, L. A. (2018). Estudio termodinámico de la adsorción de un colorante azóico por medio de un residuo lignocelulósico en medio acuoso. *Ingeniería y Desarrollo*, 36(1), 97-118.
- Horta de Oliveira, G. H., Corrêa, P. C., Rodrigues de Oliveira, A. P., Cunha dos Reis, R., & Alessandro Devilla, I. (2017). Application of GAB model for water desorption isotherms and thermodynamic analysis of sugar beet seeds. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12278.
- Ikhu-Omoregbe, D. I. O. (2006). Comparison of the sorption isotherm characteristics of two cassava products. *Journal International Journal of Food Properties*, 9(2), 167-177.
- Jin, Y., Tang, J., & Sablani, S. S. (2019). Food component influence on water activity of low-moisture powders at elevated temperatures in connection with pathogen control. *LWT*, 112, 108257. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108257>

- Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2007). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. *Water activity in foods: fundamentals applications, 1*, 109-154.
doi:doi.org/10.1002/9780470376454.ch9
- Labuza, T. P., & Altunakar, B. (2020). Water activity prediction and moisture sorption isotherms. *Water activity in foods: fundamentals applications*, 161-205.
doi:<https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch7>
- Leite Medeiros, M., & da Silva Lannes, S. C. (2010). Propriedades físicas de substitutos do cacau. *Food Science Technology*, 30, 243-253.
- Lema Aguirre, A. C., Basantes Morales, E. R., & Pantoja Guamán, J. L. (2017). Producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) con urea normal y polimerizada en Pintag, Quito, Ecuador. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 97-102.
- Lopes Neto, J. P., da Silva, V. R., & do Nascimento, J. W. (2009). Propriedades de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13(5), 639-644.
- López Valencia, Y. M. (2017). *Estudio de la cinetica de deshidratación osmótica para la conservación de lisa (Mugil cephalus)*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa-Perú.
- Machado Baptestini, F., Corrêa, P. C., Horta de Oliveira, G., Cecon, P. R., & Ferreira Soares, N. d. F. (2017). Kinetic modeling of water sorption by roasted and ground coffee. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39(3), 273-281.
- Machado Baptestini, F., Corrêa, P. C., Mota Ramos, A., da Silva Junqueira, M., & Ramos Zaidan, I. (2020). GAB model and the thermodynamic properties of moisture sorption in soursop fruit powder. *Revista Ciência Agrônômica*, 51(1).
- Maciel, R. M. G., Afonso, M. R. A., da Costa, J. M., & Araújo, T. M. R. (2020). Influence of albumin on guava pulp powder obtained by foam-mat drying *Engenharia Agrícola*, 40(3), 388-395.

- Martinez Lopez, A., Millan Linares, M. C., Rodriguez Martin, N. M., Millan, F., & Montserrat de la Paz, S. (2020). Nutraceutical value of kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). *Journal of Functional Foods*, *65*, 103735.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103735>
- Mathlouthi, M., & Rogé, B. (2003). Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food chemistry*, *82*(1), 61-71.
- McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. (2003). Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of food engineering*, *60*(2), 157-165.
- Moura, L. S. M., Anciens, G. L., & Azeredo, D. R. (2020). Percepção dos consumidores sobre os riscos em alimentos. *Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambient*, *1*(3), 16-31.
- Moussaoui, H., Bahammou, Y., Idlimam, A., Lamharrar, A., & Abdenouri, N. (2019). Investigation of hygroscopic equilibrium and modeling sorption isotherms of the argan products: A comparative study of leaves, pulps, and fruits. *Food and Bioproducts Processing*, *114*, 12-22.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.11.002>
- Muzaffar, K., & Kumar, P. (2016). Moisture sorption isotherms and storage study of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*, *291*, 322-327.
- Peleg, M. (2019). Models of Sigmoid Equilibrium Moisture Sorption Isotherms With and Without the Monolayer Hypothesis. *Food Engineering Reviews*, *12*(1), 1-13. doi:10.1007/s12393-019-09207-x
- Pomar Martínez, D. (2021). *Estudio de la deshidratación de subproductos de caqui para la obtención de un producto en polvo. Propuesta de diseño de un secador continuo*. Universidad Politécnica de València, València.

- Prieto García, J. O., Curbelo Sánchez, A., Albornas Carvajal, Y., Rodríguez Suárez, E., Ribalta Quesada, J., & Perez Leiva, A. (2017). Estudio de la adsorción de ácidos orgánicos en ceniza de bagazo de caña de azúcar. *Centro azúcar*, 44(3), 63-72.
- Pumacahua Ramos, A., Limaylla Guerrero, K. M., Telis Romero, J., & Lopes Filho, J. F. (2017). Isotermas e calor isostérico de adsorção da água do amido de quinoa. *Biotecnología en el Sector agropecuario y agroindustrial*, 15(1), 95-104.
- Ramírez Miranda, M., Cruz Victoria, M. T., Vizcarra Mendoza, M. G., & Anaya Sosa, I. (2014). Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada. *Revista mexicana de ingeniería química*, 13(1), 165-178.
- Reyes López, L. G., Sandoval Torres, S., Méndez Lagunas, L. L., & Barriada Bernal, L. G. (2017). CARACTERIZACIÓN DE POLVOS (HARINAS) DE MEZQUITE (*Prosopis laevigata*) PARA APLICACIONES ALIMENTARIAS. *Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química*, 14-19.
- Ribeiro Soares, A. N., Clivati, D., de Vasconcelos Melo, M. F., Gitzendanne, M., Soltis, P., Soltis, D., . . . Cruz da Silva, A. V. (2018). Genetic diversity of accessions and first generation progeny of the mangaba genebank. *Embrapa Tabuleiros Costeiros-Artigo em periódico indexado*.
- Rodrigues do Carmo, J., & da Silva Pena, R. (2019). Influencia de la temperatura y la granulometría en el comportamiento higroscópico de la harina de tapioca. *CyTA: Journal of food*, 17(1), 900-906.
- Rubio Somoza, P. E. (2018). *Diseño de un sistema de gestión de riesgos en la cadena de suministros que optimice el proceso de distribución para la exportación de alimentos en polvo para refrescos: horchata, cebada, chilate y otros similares*. Universidad DR. José Matías Delgado, Cuscatlán, La Libertad.

- Sandoval, A. J., Barreiro, J. A., De Sousa, A., Blanco, D., & Giménez, C. (2020). Características de sorción del haba pelada y la cascarilla de cacao Trinitario (*Theobroma cacao* L.) fermentado y seco. *Revista Técnica*, 43, 49+.
- Seabra Pires, F. C., & da Silva Pena, R. (2017). Optimization of spray drying process parameters for tucupi powder using the response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 54(11), 3459-3472. doi:10.1007/s13197-017-2803-5
- Silva Oliveira Gomes, M. S., Carregari Polachini, T., Lopes Filho, J. F., & Telis Romero, J. (2019). Efeito de encapsulantes no calor de sorção do pó de cajá desidratado à vácuo. *Revista Ciência Agronômica*, 50(4), 584-592.
- Sing, K. S. W. (1982). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Provisional). *Pure applied chemistry*, 54(11), 2201-2218.
- Sormoli, M. E., & Langrish, T. A. G. (2015). Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. *LWT-Food Science Technology*, 62(1), 875-882.
- Stępień, A., Witczak, M., & Witczak, T. (2020a). Moisture sorption characteristics of food powders containing freeze dried avocado, maltodextrin and inulin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, 256-261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.154>
- Stępień, A., Witczak, M., & Witczak, T. (2020b). Sorption properties, glass transition and state diagrams for pumpkin powders containing maltodextrins. *LWT*, 134, 110192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110192>
- Vega-Galvez, A., Aravena, E. L., & Lemus-Mondaca, R. (2006). Adsorption isotherms of corn (*Zea mays* L) flour. *Journal Ciencia e-Tecnologia de-Alimentos*, 26, 821-827.

Zhong, Y., Wu, Y., Zheng, Y., Zhu, H., Liu, Z., & Jiao, S. (2017). Assessment of radio frequency heating on composition, microstructure, flowability and rehydration characteristics of milk powder. *Food Science Technology*, 37(4), 544-551.