Propiedades higroscópicas de betabel [Beta vulgaris] en polvo

Hygroscopic properties of beetroot [Beta vulgaris] powder

Rangel-Marrón, Marcela * [a], Cerón-Bretón, Rosa María [b], Cerón-Bretón, Julia Griselda [c] y Lara-Severino, Reyna del Carmen [d]

[a] Universidad Autónoma del Carmen • GLT-5185-2022 • 0000-0001-8102-7966 • 226536
[b] Universidad Autónoma del Carmen • LFV-4405-2024 • 0000-0001-8647-022X • 30106
[c] Universidad Autónoma del Carmen • AGP-0379-2022 • 0000-0003-1551-7988 • 122903
[d] Universidad Autónoma del Carmen • AIB-1448-2022 • 0000-0001-6173-0187 • 357254

Clasificación: **DOI:** https://doi.org/10.35429/H.2025.1.12.22

Área: Ingeniería
Campo: Ciencias tecnológicas
Disciplina: Tecnología de alimentos
Subdisciplina: Conservación de alimentos

Key Handbooks

El betabel en la alimentación juega un papel importante para su consumo, es rico en antioxidantes, magnesio, ácido fólico, hierro y calcio, los cuáles se encuentran naturalmente disponibles. La forma de consumo de betabel es crudo, licuado, ensalada y cocido, siendo este último tener un efecto adverso a las propiedades benéficas que posee. Los productos deshidratados tienen la ventaja de mantenerse por largos periodos de tiempo sin cambiar los compuestos bioactivos presentes del alimento. La investigación ofrece un producto deshidratado en polvo que es estable y listo para ser consumido. Al mismo tiempo, logra extender el tiempo de permanencia de la hortaliza en el mercado por lo que facilita su aprovechamiento durante la postcosecha. Este trabajo evalúa la estabilidad del polvo de betabel mediante las isotermas de sorción a tres temperaturas de almacenamiento, así como también, el calor isostérico para conocer el mecanismo de sorción de agua. El estudio de las propiedades higroscópicas de betabel en polvo revela información del comportamiento fisicoquímico y termodinámico de un alimento deshidratado ante el proceso de ganancia o pérdida del contenido de humedad a diferentes temperaturas y humedades relativas durante su almacenaje, sugiere la temperatura y humedad máxima para su manejo. Las autoras del capítulo son profesoras-investigadoras de la Universidad Autónoma del Carmen institución pública del Estado de Campeche, integrantes del cuerpo académico consolidado de Ingeniería Química Aplicada, cada autora cuenta con el perfil deseable PRODEP y pertenecen al Sistema Nacional de Investigadores [SNI]. Las autoras han generado al menos 10 citas en los últimos dos años. Las palabras clave más empleadas son: isotermas de sorción, betabel y propiedades higroscópicas.

Área: Fortalecimiento de la comunidad científica

Citación: Rangel-Marrón, Marcela, Cerón-Bretón, Rosa María, Cerón-Bretón, Julia Griselda y Lara-Severino, Reyna del Carmen. 2025. Propiedades higroscópicas de betabel [Beta vulgaris] en polvo. 11-22. ECORFAN.

* ✉ [mrangel@pampano.unacar.mx]

Handbook shelf URL: https://www.ecorfan.org/handbooks.php

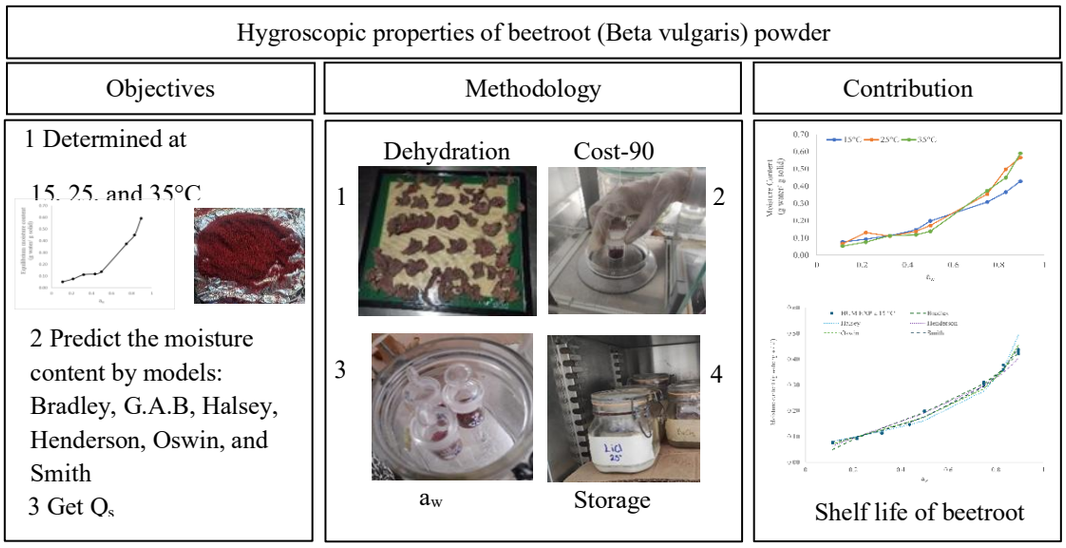
ISBN 978-607-8948-59-8 /©2009 The Authors. Published by ECORFAN-Mexico, S.C. for its Holding Mexico on behalf of Handbook HCMPDS. This is an open access chapter under the CC BY-NC-ND license [http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/]

Peer Review under the responsibility of the Scientific Committee MARVID®- in contribution to the scientific, technological and innovation Peer Review Process by training Human Resources for the continuity in the Critical Analysis of International Research.

RENIECYT
Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas
1702902 SECIHTI

Abstract

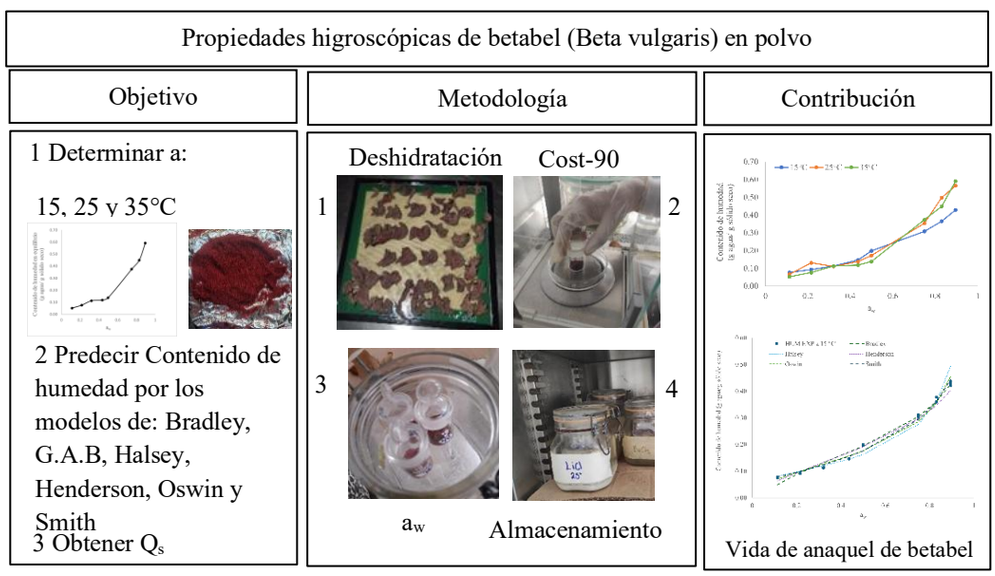
The stability of dehydrated beetroot powder at 50 ºC was evaluated by sorption isotherms at 15, 25, and 35 ºC using supersaturated saline solutions in the a_w range [0.11 – 0.90] using the isopiestic gravimetric method. Type II sorption isotherms characteristic of sugar-rich foods were obtained. The Bradley, G.A.B, Halsey, Henderson, Oswin, and Smith models described the moisture content based on the correlation coefficient [R^2] > 0.95 and the root mean square error percentage [%RMS < 10%]. The isosteric heat [Q_s] was determined by using the Clausius-Clapeyron equation. The monolayer moisture values of 2.915, 4.814, and 2.556 g water/g dry solid for 15, 25, and 35 °C obtained by the G.A.B model demonstrated that the temperature of 35 °C is adequate to maintain the shelf life of beetroot powder.



Sorption isotherms, beetroot, Hygroscopic properties

Resumen

Se evaluó la estabilidad de betabel en polvo deshidratado a 50 ºC mediante isotermas de sorción a 15, 25 y 35 ºC utilizando soluciones salinas sobresaturadas en el intervalo de a_w [0.11 – 0.90] mediante el método gravimétrico isopiéstico. Se obtuvieron isotermas de sorción tipo II características de alimentos ricos en azúcares. Los modelos de Bradley, G.A.B, Halsey, Henderson, Oswin y Smith, describieron el contenido de humedad en función del coeficiente de correlación [R^2] > 0.95 y el porcentaje de la raíz media cuadrática del error [%RMS < 10%]. Además, se utilizó la ecuación de Clausius-Clapeyron para determinar el calor isostérico [Q_s]. Los valores de humedad de la monocapa de 2.915, 4.814 y 2.556 g agua/g sólido seco para 15, 25 y 35 °C obtenidos por el modelo de G.A.B demostraron que la temperatura de 35 °C es adecuada para mantener la vida de anaquel de betabel en polvo.



Isotermas de sorción, betabel, propiedades higroscópicas

Introducción

El betabel [Beta vulgaris] es una hortaliza de raíz que se consume ampliamente en México por su sabor dulce, y principalmente por poseer compuestos antioxidantes y antiinflamatorios como la betacianina [pigmento rojo] que contribuye a la prevención del cáncer. Además, el betabel o remolacha imparte beneficios a la salud como: fibra dietética [beneficia en la digestión y colesterol en la sangre], es fuente de vitamina C y B6, minerales [folato, hierro, magnesio y potasio]. [AGRICULTURA, 2023]. Las frutas y hortalizas se caracterizan por ser perecederas, además de sufrir pérdidas durante la etapa de postcosecha, debido a que las condiciones climáticas favorecen el proceso de maduración y conllevan al deterioro prematuro de muchas variedades de frutas. Pero no solo las condiciones climáticas difíciles es la única causa de las pérdidas y desperdicios de alimentos, también suma la infraestructura, producción, empaquetado y comercialización [FAO, 2025] Por otra parte, el elevado contenido de humedad presente en ellas contribuye en gran medida a disminuir el periodo de conservación, la capacidad de procesamiento y la calidad del producto.

Actualmente, la conservación de alimentos se ha convertido en una práctica habitual con fines económicos. Para lograrlo, se emplean diversos métodos y técnicas que permiten aprovechar los excedentes de producción, transformarlos, preservarlos y disponer de ellos en períodos de escasez con el desafío constante de mantener su valor nutricional, calidad sensorial, garantizar su inocuidad y estabilidad. En este sentido, la deshidratación de alimentos evita el desarrollo de microorganismos, puesto que elimina el contenido de humedad [CH] presente, este parámetro es importante controlarlo para predecir la estabilidad de un alimento. La calidad de este dependerá de la migración de humedad, el grado de sorción o desorción del agua dependiendo de la presión de vapor de agua presente en la muestra y su entorno [Flores- Andrade et al., 2015, Basu et al., 2006].

Las isotermas de adsorción representan la relación entre la actividad de agua [a_w] y el contenido de humedad en equilibrio de un producto a temperatura y presión constante [Labuza et al., 1985]. El efecto de la temperatura es importante, puesto que los alimentos a exponen a diversas temperaturas durante su almacenamiento y procesamiento, afectando la a_w. En este sentido las isotermas permiten predecir los posibles cambios en la estabilidad de los alimentos durante su almacenamiento, seleccionar materiales de empaque y optimizar el proceso de deshidratación [Caballero-Cerón et al., 2015; Al-Muhtaseb et al., 2002: Basu et al., 2006]. Existen diferentes modelos matemáticos que describen las isotermas de sorción de alimentos, el que más se utiliza para determinar el contenido de humedad a nivel de la monocapa es el modelo de Guggenheim-Anderson-deBoer [G.A.B] y ha sido recomendado para varios productos agrícolas [Zhang et al., 2022; Al-Muhtaseb et al., 2002]. El objetivo de la presente investigación fue determinar las isotermas de sorción de betabel en polvo a 15, 25 y 35°C, predecir el contenido de humedad por medio de los modelos matemáticos de sorción de B.E.T, Bradley, G.A.B, Halsey, Henderson, Oswin y Smith y calcular el calor isostérico de sorción [Q_s] de betabel en polvo.

Metodología

Preparación de la muestra

Se utilizó betabel [Beta Vulgaris L.], adquirido en un mercado local de Ciudad del Carmen, Campeche. Se seleccionó la raíz del mismo tamaño, coloración roja y sin defectos. Se lavó y se desinfectó en una solución de cloro [50 ppm] durante 2 minutos [NOM 251, 2009]. Posteriormente, se peló y se cortaron en rodajas de 5 mm de espesor. Luego se colocaron las rodajas dentro de un secador [Excalibur, EE.UU] a 50 °C por 24 h. Al terminó del proceso, las rodajas secas se molieron y al polvo se le determinó el CH por un periodo de 24 h a 110°C y se registró el valor de a_w con un equipo Pawkit [EE.UU].

Determinación de las isotermas de sorción

Se adaptó la metodología del proyecto COST 90 [Spiess & Wolf, 1987] para determinar las isotermas de sorción de polvo de Betabel a 15 °C almacenadas en un refrigerador [IEM, México], a 25 °C se utilizó un horno [LabLine, EE. UU] y una estufa Lindgerg/Blue [Asheville NC, EE. UU] para 35 °C. El procedimiento consiste en depositar 1g de muestra en pesafiltros por triplicado, los cuales serán almacenados en celdas de sorción a humedad relativa constante. Cada celda contiene soluciones salinas sobresaturadas de LiCl, CH_3COOK, $MgCl_2$, K_2CO_3, $Mg[NO_3]_2$, NaCl, KCl, $BaCl_2$ de actividad de agua conocida [Tabla 1]. El registro de la ganancia o pérdida de humedad se realizó cada tercer día hasta alcanzar una masa constante de [± 0.0001 g].

Box 1

Tabla 1

Soluciones salinas sobresaturadas

Reactivo	15 °C	25 °C	35 °C
LiCl	0.11	0.11	0.11
CH_3COOK	0.23	0.23	0.22
$MgCl_2$	0.32	0.32	0.32
K_2CO_3	0.43	0.43	0.43
NaCl	0.74	0.74	0.74
KCl	0.85	0.85	0.83
$BaCl_2$	0.91	0.91	0.89

Fuente: Elaboración propia

Modelos matemáticos y análisis estadístico

Se emplearon los modelos matemáticos de Brunauer-Emmett-Teller [B.E.T], Guggenheim-Anderson-deBoer [G.A.B], Bradley, Halsey, Henderson, Oswin y Smith para realizar el cálculo de la estabilidad teórica ecuaciones [1-7]. Para resolver el modelo de G.A.B se utilizó regresión no lineal por medio de la función SOLVER de Excel.

B.E.T. $$X_{(aw)}=\frac{X_{mb}C_b a_w}{[(1-a_w)(1+(C_b-1)a_w)]} \quad [1]$$

G.A.B $$X_{(aw)}=\frac{X_{mg}C_g K a_w}{[(1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)]} \quad [2]$$

Bradley $$X_{[aw]}=a+b\,ln(-ln\,a_w) \quad [3]$$

Halsey $$X_{[aw]}=exp[a+b\,ln(-ln\,a_w)] \quad [4]$$

Henderson $$X_{[aw]}=exp[a+b\,ln(-ln(1-a_w))] \quad [5]$$

Oswin $$X_{[aw]}=exp(a+b\,ln[a_w/(1-a_w)]) \quad [6]$$

Smith $$X_{[aw]}=a+b\,ln(1-a_w) \quad [7]$$

En donde: $X[a_w]$=Humedad en equilibrio en base seca [g agua/g de solido seco]; a_w=Actividad de agua; $X[_{mb}]$=Humedad de la monocapa en base seca [B.E.T, g agua/g sólido seco]; C_b=Constante relacionada con el calor de porción [B.E.T]; $X[_{mg}]$=Humedad de la monocapa en base seca [G.A.B, g agua/g sólido seco]; C_g=Constante de Guggenheim; K=Constante de correlación de las propiedades de la multicapa con respecto al líquido [G.A.B]; a=Constante de los modelos de sorción de Bradley, Halsey, Henderson, Oswin y Smith; b=Constante de los modelos de sorción de Bradley, Halsey, Henderson, Oswin y Smith C=Constante característica del producto de los modelos de B.E.T y G.A.B.

Se eligió el modelo que mejor predijera el contenido de humedad tomando como parámetros el coeficiente de correlación [R^2>90] y la raíz media cuadrática del error inferior del 10% [RMS <10%] ecuación 8

$$\%RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{W_e-W_p}{W_e}\right]^2}{N}}\; X\; 100\% \quad [8]$$

Donde W_e es el contenido de humedad experimental en equilibrio [g agua/ g sólido seco], W_p es el contenido de humedad teórico [g agua/ g sólido seco]; N es el número de puntos experimentales: i es el número de secuencia.

Calor isostérico de sorción

Para determinar la energía requerida durante el proceso de desorción, se calculó el calor isostérico [Q_s] aplicando la ecuación de Clausius-Clapeyron [ecuación 9]. Se relacionó el In [a_w] vs [1/T] a través de la pendiente generada.

$$\frac{\partial ln a_w}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} = -\frac{Qs}{R} \quad [9]$$

Donde: a_w es la actividad de agua, T es la temperatura en °K, R es la constante universal de los gases 1.98717 cal/mol°K, Q_s es el calor isotérico cal/mol.

Resultados

Isotermas de sorción

El polvo de betabel al término del proceso de deshidratación alcanzó un contenido de humedad de 0.109 g agua/ gramos de sólido seco. En la Figura 1 representa el contenido de humedad en equilibrio de betabel en polvo. La isotermas obtenidas corresponden a isotermas de tipo II, que poseen una adsorción física en multicapas, este tipo de isotermas se caracterizan por exhibir una tendencia asintótica conforme aumenta el valor de actividad de agua, la cuál es común en los productos alimenticios de acuerdo con la clasificación de Branauer et al. [1940a]. Así como también presentan Los resultados dejaron en evidencia que, el efecto de la temperatura es importante, puesto que al exponer el betabel en polvo a diversas temperaturas durante su almacenamiento se ve afectada la a_w y el contenido de humedad en equilibrio. Se observó que, el contenido de humedad incrementa conforme aumenta la temperatura cuando las muestras de betabel en polvo son almacenadas en una atmósfera de a_w superior a 0.60, alcanzando 0.591 g agua/g sólido seco a 35 °C y va disminuyendo a 0.566 y 0.429 g agua/g sólido seco a 25 y 15 °C, respectivamente. Sugiriendo que las interacciones de los componentes con el agua se ven disminuidos con la superficie de adsorción debido a la temperatura. Este tipo de comportamiento es observado en alimentos con alto contenido de azúcares como son las frutas, puesto existe una mayor solubilidad de los azúcares generados por el incremento de la temperatura de almacenamiento [Ramírez-Miranda et al., 2014; Labuza et al., 1985]. Por otra parte los resultaron mostraron que, en el intervalo de a_w 0.11 – 0.49, el comportamiento del contenido de humedad en equilibrio es inverso, la disminución de la temperatura afecta el parámetro de interés. Este comportamiento se puede atribuir, a que las moléculas de agua se encuentran unidas débilmente, es decir que, se observa la transición a agua ligada a agua libre y posteriormente el agua se comporta como agua libre la cuál puede unirse a los espacios disponibles generados durante el proceso de deshidratación [Basu et al., 2006]

Box 2

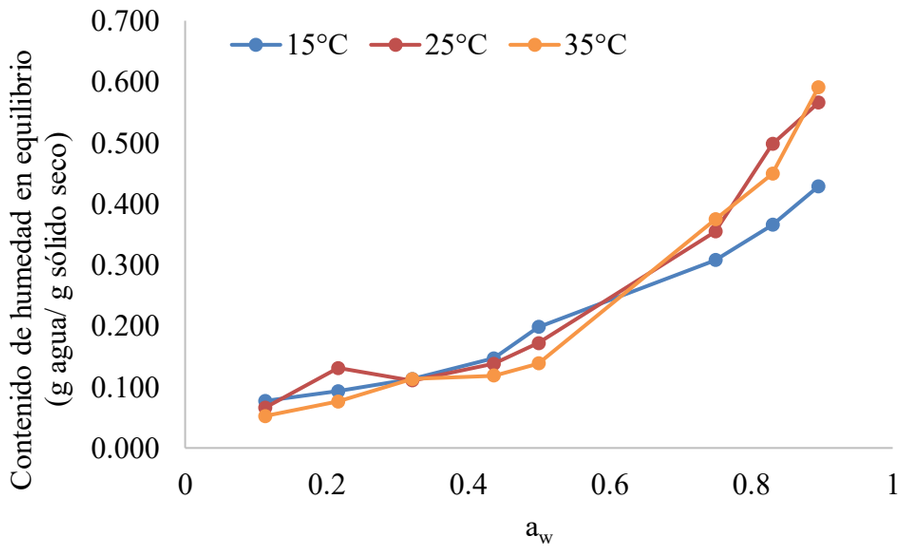


Figura 1

Isotermas de sorción de betabel en polvo a 15, 25 y 35 °C

Fuente: Elaboración propia

Modelos matemáticos para predecir el contenido de humedad

En la figura 2 se representa el contenido de humedad predicha de betabel en polvo a 15 ,25 y 35 °C figura 2A, 2B, y 2C, respectivamente para los modelos de Bradley, Halsey, Henderson, Oswin y Smith.

Se observa que los modelos de sorción describen el contenido de humedad experimental a las tres temperaturas estudiadas en todo el intervalo de a_w [0.1 -1.0] con un valor de R^2 superior del 90% y un %RMS inferior del 10% como se observa en las Tablas 2, 3 y 4 para 15, 25 y 35 °C respectivamente. Por lo que queda en evidencia que la aplicación de los modelos es pertinente para este tipo de alimento. El modelo de B.E.T no describió el comportamiento del contenido de humedad experimental puesto que excede el 10% de RMS. El modelo de G.A.B predice el contenido de humedad experimental en el intervalo de a_w estudiado [Figura 3a, 3b y 3c] obteniéndose coeficientes de correlación superiores. Al mismo tiempo, el modelo de G.A.B obtuvo un R^2 superior al 94% y un %RMS inferior del 5% para las tres temperaturas del almacenamiento [Tabla 2, 3 y 4], lo que indica que esta ecuación es adecuada en la predicción de isotermas de adsorción de betabel en polvo. Los valores de humedad de monocapa obtenidos por el modelo de G.A.B fueron: 2.915, 4.814 y 2.56 g agua/g sólido seco para 15, 25 y 35 °C, respectivamente [Tablas 2, 3 y 4]. Observándose que, a la temperatura de 35 °C la adsorción de agua en la monocapa es menor.

Box 3

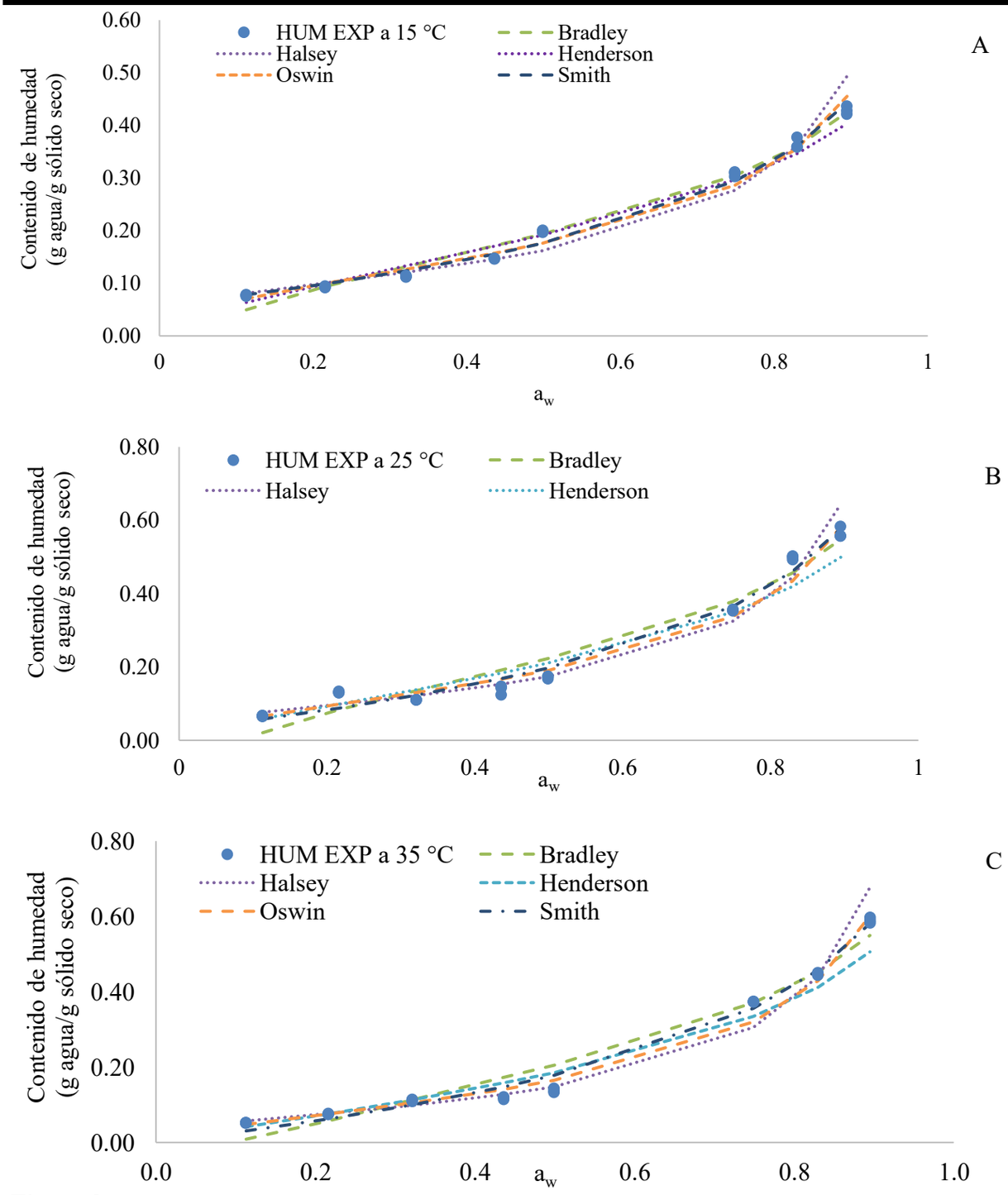


Figura 2

Predicción del contenido de humedad de betabel en polvo a 15 , 25 y 35 °C

Fuente: Elaboración propia

Box 4

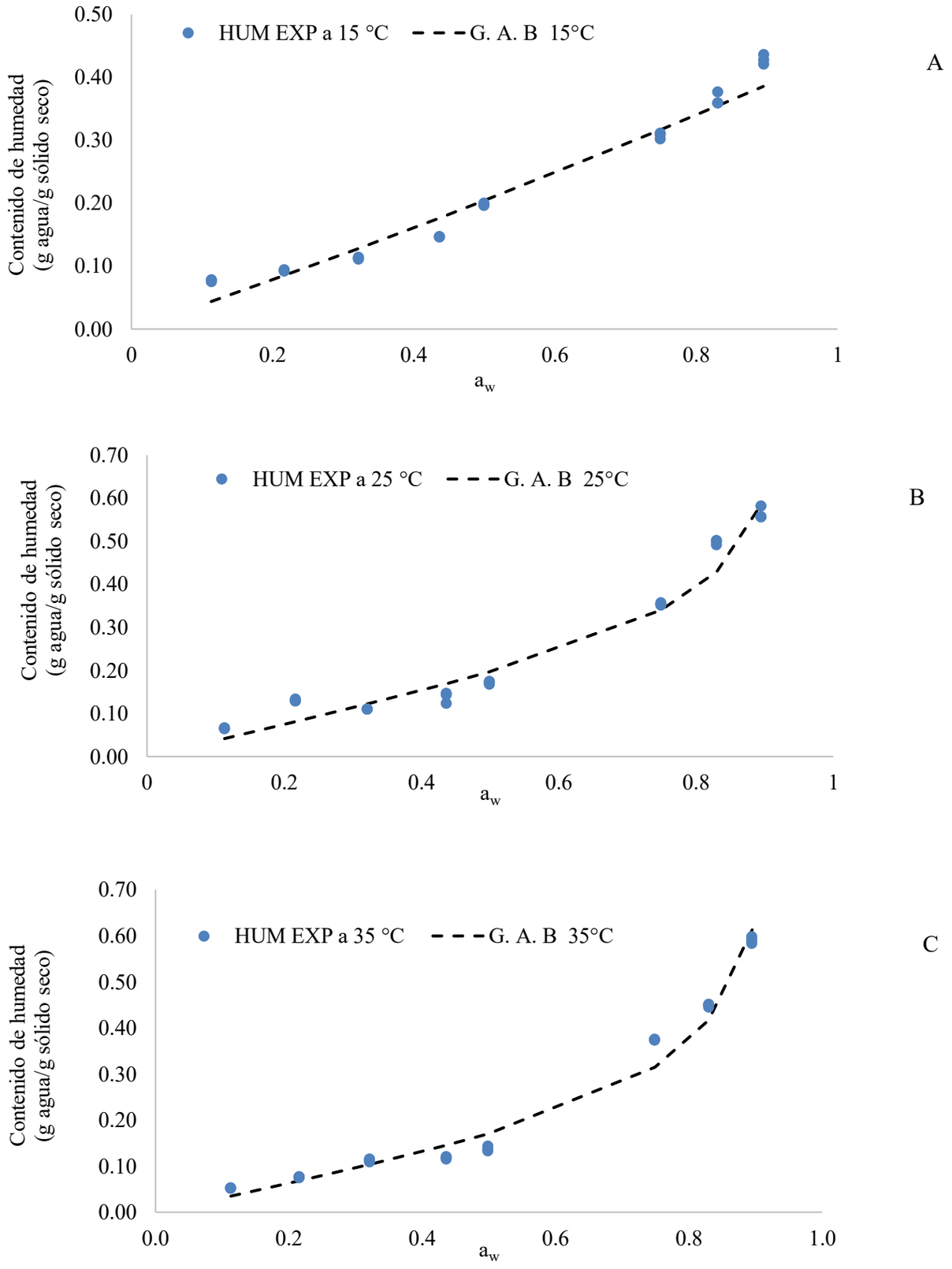


Figura 3

Predicción del contenido de humedad de betabel en polvo a 15, 25 y 35 °C por el modelo de G.A.B

Fuente: Elaboración propia

Box 5

Tabla 2

Valores de criterios de predicción de betabel en polvo a 15 °C

	Bradley	Halsey	Henderson	Oswin	Smith	G.A.B
A	0.147	-2.039	-1.419	-1.736	0.057	-
B	-0.126	-0.606	0.629	0.443	-0.170	-
R^2	0.984	0.971	0.966	0.981	0.989	0.994
% RMS	3.106	2.059	2.308	1.685	1.347	3.727
K	-	-	-	-	-	0.106
C1	-	-	-	-	-	1.229
Mo	-	-	-	-	-	2.915

Fuente: Elaboración propia

Box 6

Tabla 3

Valores de criterios de predicción de betabel en polvo a 25 °C

	Bradley	Halsey	Henderson	Oswin	Smith	G.A.B
A	0.158	-2.012	-1.287	-1.654	0.029	-
B	-0.176	-0.714	0.729	0.518	-0.243	-
R^2	0.948	0.959	0.922	0.954	0.978	0.962
% RMS	6.954	2.867	4.294	3.089	3.421	4.566
K	-	-	-	-	-	1.020
C1	-	-	-	-	-	0.074
Mo	-	-	-	-	-	4.814

Fuente: Elaboración propia

Box 7

Tabla 4

Valores de criterios de predicción de betabel en polvo a 35 °C

	Bradley	Halsey	Henderson	Oswin	Smith	G.A.B
A	0.137	-2.215	-1.372	-1.800	-0.0002	-
B	-0.187	-0.830	0.850	0.602	-0.257	-
R^2	0.953	0.982	0.951	0.980	0.986	0.975
% RMS	7.945	2.204	4.017	2.439	4.373	3.749
K	-	-	-	-	-	1.022
C1	-	-	-	-	-	0.116
Mo	-	-	-	-	-	2.556

Fuente: Elaboración propia

Calor isostérico de sorción

Se utilizó la ecuación de Clausius-Clapeyron para determinar el calor isostérico de sorción, se relacionaron los valores del In [a_w] frente al 1/T en °K para cada contenido de humedad en equilibrio a las tres temperaturas de estudio.

Se observa en la Figura 4 que el valor de Q_s alcanza su valor máximo cuando el contenido de humedad en equilibrio se encuentra alrededor de 0.10 g agua/ g sólido seco, posteriormente disminuye hasta alcanzar un valor de Q_s de 196 cal/mol con un contenido de humedad de 0.53 g agua/g sólido seco, lo resultados sugieren a una rápida absorción de agua proveniente de los azúcares presentes en el betabel, por lo anterior el Q_s disminuye conforme aumenta el contenido de humedad en equilibrio.

Box 8

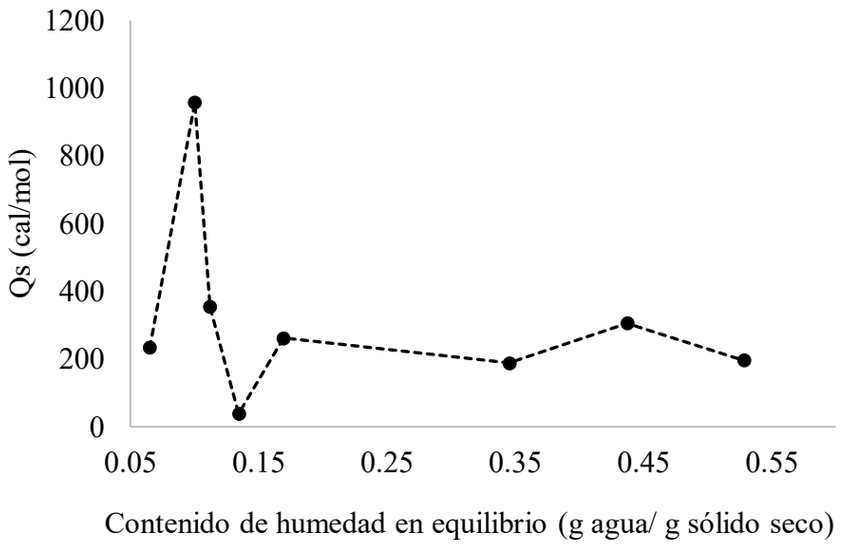


Figura 4

Calor isostérico de sorción de betabel en polvo en función del contenido de humedad en equilibrio [g agua/ g sólido seco]

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Las isotermas de sorción obtenidas para betabel en polvo a las tres temperaturas de estudio corresponden a Isotermas Tipo II, para alimentos ricos en azúcares. Se observó que la temperatura de almacenamiento tuvo un efecto en el contenido de humedad en equilibrio. El modelo de B.E.T no exhibió un buen ajuste de los datos experimentales. Por otro parte el resto de los modelos matemáticos utilizados para predecir el contenido de humedad, exhibieron un ajuste superior de R^2 del 90% y un %RMS inferior al 10%, en el intervalo de a_w de 0.1 a 0.9, a 15, 25 y 35 ºC. El calor isostérico de sorción reveló que, existe una rápida absorción de agua y disminuye conforme aumenta la humedad en equilibrio hasta alcanzar un valor de Q_s de 196 cal/mol. La temperatura optima de almacenamiento a 35 ºC resultó ser adecuada para mantener el betabel en polvo sin generar apelmazamiento.

Declaraciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. No tienen intereses financieros o relaciones personales que pudieran haber influido en este libro.

Contribución de los autores

Rangel-Marrón, Marcela: Responsable del proyecto de investigación, desarrollo del experimento, análisis de datos y escritura del trabajo.

Cerón-Bretón, Rosa María: Responsable de la ejecución de los experimentos, análisis de datos.

Cerón-Bretón, Julia Griselda: Responsable del análisis de laboratorio, escritura del trabajo.

Lara-Severino, Reyna del Carmen: Responsable del formato del trabajo.

Disponibilidad de datos y materiales

Los datos están disponibles en el presente documento.

Financiación

La investigación fue financiada por Marcela Rangel Marrón

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Carmen por las facilidades otorgadas

Abreviaturas

a_w	Actividad de agua
B.E.T	Brunauer-Emmett-Teller
CH	Contenido de humedad
G.A.B	Guggenheim-Anderson-deBoer
HUM EXP	Humedad Experimental
Q_s	Calor isostérico de sorción
RMS	Raíz media cuadrática del error

Referencias

Antecedentes

Basu, S., Shivhare, U. S., & Mujumdar, A. S. [2006]. Models for sorption isotherms for foods: A Review. *Drying Technology*, 24[8], 917-930.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [AGRICULTURA]. [2023]. El Betabel: Un tesoro bajo la tierra. El Betabel: Un tesoro bajo la tierra | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx

Básicos

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A. [2002]. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 80[2], 118-128.

Caballero-Cerón, C., Guerrero-Beltrán, J. A., Mújica-Paz, H., Torres, J. A., & Welti-Chanes, J. [2015]. Moisture sorption isotherms of foods: Experimental methodology, mathematical analysis, and practical applications. En G. F. Gutiérrez-López, L. Alamilla-Beltrán, M. del Pilar Buera, J. Welti-Chanes, E. Parada-Arias, & G. Barbosa-Cánovas [Eds.], *Water Stress in Biological, Chemical, Pharmaceutical and Food Systems* [pp.187-214].

Flores-Andrade, E., Azuara-Nieto, E., Beristain-Guevara, C. I., Monroy-Villagrana, A., Téllez-Medina, D. I., Pascual-Pineda, L. A., Alamilla-Beltrán, L., & Gutiérrez-López, G. F. [2015]. Food Preservation by Nanostructures-Water Interactions Control. En G. F. Gutiérrez-López, L. Alamilla-Beltrán, M. del Pilar Buera, J. Welti-Chanes, E. Parada-Arias, & G. Barbosa-Cánovas [Eds.], *Water Stress in Biological, Chemical, Pharmaceutical and Food Systems* [pp. 15–25].

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. [2025] Technical plarform on the measurement and reduction of food loss and waste.

Zhang, L., Grace, P. M., & Sun, D. W. [2022]. A new theoretical model for moisture sorption isotherms and its application in deriving a hygroscopicity index for food products. *Journal of Food Engineering*, 315[3], 110817.

Soporte

Labuza, T. P., Kaanane, A., & Chen, J. Y. [1985]. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. *Journal of Food Science*, 50[2], 385-392.

NORMA Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios

Spiess, W.L y Wolf, W. [1987]. Critical Evaluation of Methods to Determine Moisture Sorption Isotherms, En Rockland, L.B & Beuchat, L.R [Eds], *Water Activity; Theory and Applications to Food* [pp 19] Marcel Dekker, New York

Discusiones

Brunauer, S.; Deming, L.S., & Teller, E. [1940a] On a theory of Van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*, 62[7], 1723-1732.

Ramírez-Miranda, M., Cruz y 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.