

Isotermas de adsorción y propiedades termodinámicas en harina de tarwi (*Lupinus mutabilis*)

Adsorption isotherms and thermodynamic properties in tarwi (*Lupinus mutabilis*) flour

Santos Martín Briceño-Sevillano¹ ; Lubberto Marceliano-Sánchez² ; Rodolfo Moisés Vegas-Niño^{2*} 

¹Programa Nacional de Alimentación Escolar - Qali Warma, Cajabamba, Perú; e-mail: santos.briceno@qw.gob.pe

²Universidad Nacional de Trujillo, Huamachuco, Perú; e-mail: lmarceliano@unitru.edu.pe, rvegas@unitru.edu.pe

*autor de correspondencia: rvegas@unitru.edu.pe

Cómo citar: Briceño-Sevillano, S.M.; Marceliano-Sánchez, L.; Vegas-Niño, R.M. 2025. Isotermas de adsorción y propiedades termodinámicas en harina de tarwi (*Lupinus mutabilis*). Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 28(1):e2540. <http://doi.org/10.31910/rudca.v28.n1.2025.2540>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: enero 23 de 2024

Aceptado: junio 10 de 2025

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

En Perú, el tarwi (*Lupinus mutabilis*) se comercializa principalmente como grano entero, su conversión en harina es limitada y casi nula como harina desgrasada o hidrolizada. Aunque es rico en proteínas y lípidos, su valorización en el mercado peruano sigue siendo baja. Las isotermas de sorción son herramientas fundamentales para estudiar procesos, como secado, mezcla, permeabilidad y envasado, permitiendo predecir la estabilidad fisicoquímica de los alimentos. En este estudio se evaluaron por gravimetría, las isotermas de sorción de harinas de tarwi, en tres condiciones: deslupinizada (1), desgrasada (2) e hidrolizada (3), junto con sus propiedades termodinámicas. Las muestras se expusieron a actividades de agua (a_w), entre 0,1 y 0,9 y a temperaturas de 20, 30 y 40 °C. Los datos obtenidos fueron ajustados mediante el modelo GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer). Se analizaron parámetros, como calor isostérico (Q_{st}), superficie de adsorción (A_s), entropía de sorción (ΔS) y energía libre de Gibbs (ΔG). Se observó que al aumentar la a_w , también lo hizo la humedad de equilibrio (X_m), mientras que para una a_w constante, el aumento de temperatura redujo X_m . Las isotermas mostraron una forma sigmoideal tipo II. Los mayores valores de Q_{st} se registraron en la harina hidrolizada. Los valores de monocapa y área superficial fueron mayores a 20 °C, en todos los casos; además, la harina condición en 2 tuvo los máximos valores, con 0,087 g H₂O/g m.s. y 308,86 m²/g m.s., respectivamente, mientras que ΔG indicó espontaneidad en los procesos para condiciones 2 y 3.

Palabras clave: Calor isostérico; Isoterma GAB; Seguridad alimentaria; Semilla de leguminosa; Superficie de adsorción.

ABSTRACT

In Peru, Andean lupin (*Lupinus mutabilis*) is marketed primarily as a whole grain, its conversion into flour is limited and almost nonexistent as defatted or hydrolyzed flour. Although it is rich in proteins and lipids, its market value in Peru remains low. Sorption isotherms are fundamental tools for studying processes such as drying, mixing, permeability, and packaging, allowing for the prediction of the physicochemical stability of foods. In this study, the sorption isotherms of tarwi flours were evaluated gravimetrically under three conditions: delupinized (1), defatted (2), and hydrolyzed (3), along with their thermodynamic properties. The samples were exposed to water activities (a_w) ranging from 0.1 to 0.9 and 20, 30, and 40 °C temperatures. The data obtained were fitted using the GAB model (Guggenheim, Anderson, and de Boer). Parameters such as isosteric heat (Q_{st}), adsorption surface area (A_s), sorption entropy (ΔS), and Gibbs free energy (ΔG) were analyzed. It was observed that as a_w increased, so did the equilibrium humidity (X_m), while for a constant a_w , increasing temperature reduced X_m . The isotherms displayed a type II sigmoidal shape. The highest Q_{st} values were recorded in the hydrolyzed flour. The monolayer and surface area values were greater at 20 °C in all cases; in addition, flour in condition 2 had the highest values with 0.087 g H₂O/g d.m. and 308.86 m²/g d.m., respectively, while ΔG indicated spontaneity in the processes for conditions 2 and 3.

Keywords: Adsorption surface; Food security; GAB isotherm; Isosteric heat; Legume seed.

INTRODUCCIÓN

El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) es una leguminosa originaria de la región andina de Perú, Bolivia y Ecuador. Se ha cultivado desde la época preinca (Gulisano *et al.* 2019) y desempeña un papel fundamental en la alimentación y economía de las poblaciones indígenas de esta región.

La Libertad es la mayor productora de tarwi en Perú, con una representación del 32 %, a nivel nacional (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2023). El tarwi es la única especie del género *Lupinus* que ha sido domesticada y cultivada en América del Sur (Simioniuc *et al.* 2021), lo que lo convierte en un recurso de gran importancia para la seguridad alimentaria. Las semillas del tarwi destacan por su contenido de proteínas (44 %) (Czubinski *et al.* 2021). Además, tienen entre un 14 y 24% de lípidos (Gross *et al.* 1988), aunque se reportan concentraciones de lípidos entre 13,6 y 18,6% (Berru *et al.* 2021). Asimismo, poseen concentraciones importantes de calcio, fibra, hierro, zinc y son libres de gluten. Debido a estas cualidades nutricionales, el consumo del tarwi se considera estratégico, especialmente, para madres lactantes y niños en desarrollo, como una de las alternativas en la lucha contra la desnutrición infantil (Carvajal-Larenas *et al.* 2016).

La inclusión del tarwi en la dieta del ser humano no solo previene, sino que también contribuye al tratamiento de enfermedades metabólicas, como la obesidad, la diabetes y las cardiovasculares, además, de su notable potencial industrial en la producción de alimentos procesados o semiprocados (Chalampunte-Flores *et al.* 2023). Se reporta que la harina de tarwi es utilizada en la elaboración de productos alimenticios, tales como pan, pasteles, galletas, bizcochos, fideos, sopas instantáneas y embutidos, lo que la convierte en una excelente alternativa para personas con intolerancia al gluten, como aquellos que padecen la enfermedad celíaca (Córdova-Ramos *et al.* 2020; Karoui *et al.* 2023).

Durante el almacenamiento, los alimentos secos entran en contacto con el entorno circundante, lo que da lugar al intercambio de humedad y calor. Este proceso conlleva variaciones en la temperatura y la humedad del grano (Novoa, 2019). Estas fluctuaciones de energía y humedad relativa pueden desencadenar reacciones que afecten negativamente su calidad (Abati *et al.* 2021; Lancelot *et al.* 2021), por lo tanto, resulta fundamental llevar a cabo la caracterización y la predicción del efecto de factores externos, como la temperatura y la humedad relativa, en el comportamiento de absorción de agua en varias formas de harina de tarwi, utilizando modelos termodinámicos. Las propiedades termodinámicas de los alimentos ofrecen información importante para predecir su comportamiento durante su almacenamiento (Rosa *et al.* 2010).

Los modelos de isoterma de sorción desempeñan un papel relevante en la preservación de la calidad de los alimentos (especialmente, los secos), al permitir comprender la relación entre el contenido de humedad y la actividad del agua (García *et al.* 2008). Entre estos modelos, destaca el modelo GAB (Guggenheim, Anderson y de Boer), que demuestra una excelente capacidad para describir los datos experimentales en un amplio rango de a_w (0,1 – 0,9); por lo tanto, es ampliamente utilizado en la industria de alimentos para predecir la humedad en equilibrio durante el almacenamiento (Lewicki, 1997; Alamri *et al.* 2018). Por

su parte, el calor isostérico de sorción permite una comprensión del estado del agua y su afinidad por la superficie del alimento, mientras que la entropía de sorción diferencial se asemeja a los sitios de sorción, disponibles en niveles de energía específicos (Esfe *et al.* 2023).

La relación entre estas propiedades y la entalpía puede ser establecida mediante la teoría de la compensación, que refleja la fuerza impulsora detrás del proceso de sorción de humedad y la naturaleza del proceso (Chen *et al.* 2023). Estudios, como los de McMinn & Magee (2003), McMinn *et al.* (2005), Martín-Santos *et al.* (2012), Ayala Aponte (2016), Wan *et al.* (2018), Azhar *et al.* (2021), Ouaabou *et al.* (2021) y Cheng *et al.* (2023) han llevado a cabo la caracterización y modelado del comportamiento de productos alimentarios durante el almacenamiento, en diversas condiciones.

Por lo tanto, este estudio se centró en evaluar cómo la temperatura y la humedad relativa afecta a las isothermas de sorción de humedad y a las propiedades termodinámicas de diferentes tipos de harina de tarwi, como la deslupinizada, desgrasada e hidrolizada por proteasa, teniendo en cuenta que la harina deslupinizada podría ser empleada como insumo en la sustitución parcial de panes, galletas y barras energéticas; la harina desgrasada, para fideos y batidos instantáneos y la harina hidrolizada, para fórmulas infantiles y personas de avanzada edad, por su mayor digestibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Acondicionamiento de harina de *Lupinus mutabilis*. Se preparó harina de tarwi (variedad “Alta Gracia”) en tres condiciones, identificadas como tipo 1, tipo 2 y tipo 3 y luego de su preparación fueron envasadas en recipientes herméticos.

La harina tipo 1, se obtuvo a partir de tarwi deslupinizado (eliminación de alcaloides por lixiviación con agua por ocho días, previa cocción del grano), el cual, se transformó en pasta, con un triturador casero, adicionando agua purificada, en relación tarwi: agua de 1:3 (p/p); luego, se sometió a un secado en estufa a 45 °C, por 48 h, en bandejas de acero inoxidable y, posteriormente, se procedió a reducir el tamaño de las partículas a $\leq 1,0$ mm.

Para la obtención de harina tipo 2, se utilizó como base la de tipo 1. Esta última fue desgrasada en un extractor Soxhlet, empleando etanol de 96° GL. Posteriormente, se secó en estufa a 45 °C, durante 24 h y luego se trituró, a un tamaño de partícula $\leq 1,0$ mm.

Para la obtención de harina tipo 3, se utilizó como base la de tipo 2, mediante un proceso de hidrólisis, utilizando una proteasa de *Bacillus* sp. (Protamex®). Las condiciones de hidrólisis fueron pH 7,0 y temperatura 34 °C, por 8 horas. La concentración de enzima aplicada fue de 0,3 g por cada 50 g de sustrato, con una concentración de harina en la solución del 0,33 %. Una vez finalizada la hidrólisis, la harina se sometió a secado, trituración y tamizado, para obtener partículas $\leq 1,0$ mm.

Determinación de las isothermas de sorción de humedad. Las isothermas de sorción de las harinas de tarwi se construyeron para un

intervalo de a_w de 0,1 – 0,9 y temperaturas de 20, 30 y 40 °C. Los valores de a_w se acondicionaron con soluciones de H₂SO₄ (Bhandari & Adhikari, 2008), como se detalla en la tabla 1.

Estas soluciones se dispusieron en envases de vidrio de 1.000 cm³, con cierre hermético, en una cantidad de 100 g de solución. En

cada uno de ellos, se colocó un vaso de vidrio conteniendo un vaso más pequeño con la muestra de harina, en una cantidad de ≈1 g. Luego, se dispuso en ambientes a 20, 30 y 40 °C, por 7 días (peso constante), para su posterior análisis gravimétrico.

Tabla 1. Concentraciones de ácido sulfúrico (% p/p) que, a diversas temperaturas (20, 30 y 40°C), permiten obtener distintos valores de actividad de agua (a_w).

Temperatura (°C)	a_w								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	% H ₂ SO ₄								
20	70,9	58,2	53,2	48,3	43,3	37,9	31,4	24,9	18,5
30	72,6	58,5	53,5	48,5	43,6	38,1	31,6	25,0	18,5
40	74,3	58,9	53,9	48,8	43,8	38,3	31,7	25,1	18,4

Ajuste al modelo de GAB. Los datos experimentales de humedad en equilibrio en función a la actividad de agua fueron modelados, empleando la ecuación de GAB (Ecuación 1).

$$X_m = \frac{X_0 \cdot C_G \cdot K_G \cdot a_w}{(1 - K_G \cdot a_w)(1 - K_G \cdot a_w + C_G \cdot K_G \cdot a_w)} \quad \text{ecuación 1}$$

En la que, X_m representa la humedad en equilibrio a una determinada actividad de agua (a_w) y depende de la temperatura; X_0 representa el valor de monocapa y C_G y K_G son las constantes cinéticas de absorción de humedad en la monocapa, como en la multicapa, respectivamente.

Los tres parámetros del modelo de GAB (X_0 , C_G y K_G) fueron determinados a través de una regresión cuadrática, empleando el programa Excel. Se determinó, además, el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio relativo (EMR) (Maftoon Azad *et al.* 2023) (Ecuación 2):

$$EMR = \left[\frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_m^* - X_m}{X_m^*} \right) \right] \quad \text{ecuación 2}$$

donde X_m^* y X_m representan el contenido de agua en equilibrio experimental y predicho por la ecuación de GAB, respectivamente; N es la cantidad de observaciones.

Cuantificación del calor isostérico de sorción. El calor isostérico de sorción (Q_{st}) representa la cantidad de energía que se libera durante el proceso de sorción de moléculas de agua por una superficie adsorbente, constituyendo un referente de la condición del agua absorbida por la matriz sólida (Panigrahi *et al.* 2022). Se relaciona Q_{st} con el calor isostérico neto de sorción (q_{st}) al sumarle a éste, el calor latente de vaporización del agua ($L_V = 43$ kJ/mol), a la temperatura del sistema que se esté trabajando (Moreira *et al.* 2008). Esto se presenta en la ecuación 3.

$$Q_{st} = q_{st} + L_V \quad \text{ecuación 3}$$

q_{st} cuantifica la energía que se requiere en producir un cambio de estado de líquido a vapor de una unidad de masa, ocurriendo estos a

temperatura y actividad de agua constantes (Mallek-Ayadi *et al.* 2020). Su determinación es a través del modelo de Clausius-Clapeyron (Ecuación 4), diagramando $\ln(a_w)$ vs $1/T$ (Kelvin) (López-Vidaña *et al.* 2021).

$$\ln(a_w) = - \left(\frac{q_{st}}{T} \right) \left(\frac{1}{T} \right) + C \quad \text{ecuación 4}$$

Donde, q_{st} es el calor isostérico neto de sorción (J/mol); T es la temperatura absoluta (K); R es la constante de los gases (8,314 J/mol.K) y C un constante de integración, que depende del contenido de humedad en el material.

Determinación de la superficie de adsorción. La superficie de adsorción se correlaciona con las propiedades de retención de agua de los alimentos; mientras mayor sea su valor, mayor será el agua que el alimento pueda absorber (Arslan-Tontul, 2020). El área superficial de adsorción de las muestras fue determinada con la ecuación 5 (Fan *et al.* 2015), empleando el valor de monocapa obtenido mediante el modelo GAB.

$$A_S = \frac{X_0 \cdot N_A \cdot A_{H_2O}}{M_{H_2O}} = 3,53 \cdot 10^3 \cdot X_0 \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, A_S es el área superficial de adsorción (m²/g b.s.); X_0 es el contenido de humedad de la monocapa (g agua/g m.s.); N_A es el número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol)/g; A_{H_2O} es el área de la molécula de agua ($1,06 \times 10^{-19}$ m²) y M_{H_2O} es el peso molecular del agua (18 g/mol).

Determinación de la entropía de sorción. El cambio de entropía en sistemas alimentarios es importante en el análisis energético de su procesamiento, porque es proporcional al número de sitios de sorción disponibles en un nivel de energía específico (Koua *et al.* 2014). La entropía diferencial de sorción (ΔS) fue determinada según ecuación 6:

$$\ln(a_w) = - \left(\frac{q_{st}}{RT} \right) + \frac{\Delta S}{R} \quad \text{ecuación 6}$$

ΔS se obtiene graficando $\ln(a_w)$ y $1/T$ para determinado contenido de humedad, donde la intersección con el eje Y ($\ln(a_w)$) representa $\Delta S/R$.

Determinación de la energía libre de Gibbs. El cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG) se utiliza para evaluar la afinidad del material adsorbente por las moléculas de agua, brindando información de si el proceso es espontáneo o no (Sánchez-Torres *et al.* 2021). Su cuantificación se realiza mediante la ecuación 7, para cada temperatura (Fakhfakh *et al.* 2018).

$$\Delta G = q_{st} - T \cdot \Delta S^0 \quad \text{ecuación 7}$$

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de significancia del 95 %, sobre los valores de monocapa, para determinar el efecto de la temperatura. Se aplicó una prueba de comparaciones múltiples (LSD) para determinar la diferencia de grupos en función a la temperatura. Para esto se empleó el programa estadístico libre R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Isotermas de sorción de harinas de tarwi. En la figura 1, se presentan las isotermas de adsorción de humedad de equilibrio de los tres tipos de harina de tarwi a las temperaturas estudiadas (20, 30 y 40 °C). En ellas, se observa que el contenido de humedad de equilibrio de las harinas disminuyó al incrementar la temperatura para una a_w constante. Este fenómeno se puede explicar por el hecho de que el incremento de temperatura lleva consigo un aumento en la cantidad de energía y la actividad de las moléculas de agua. Como consecuencia, el movimiento molecular se torna más rápido y las distancias intermoleculares son mayores. Entonces, las moléculas de agua disminuyen su estabilidad, con lo que se desprenden más fácilmente de los sitios de unión con las moléculas de los alimentos; este fenómeno también fue reportado por Arslan-Tontul (2020). Además, la modificación de los sitios activos ocasionada al incrementar la temperatura conlleva a una disminución de sitios activos disponibles para la adsorción de moléculas de agua (Li *et al.* 2021).

Asimismo, se observa que, independientemente de las temperaturas, en las tres condiciones de harina, la humedad de equilibrio se tiende a incrementar lentamente, al aumentar la actividad de agua y, a partir de $a_w > 0,6$, los valores de X_m crecen bruscamente. Las isotermas presentaron una forma sigmoideal con un comportamiento tipo II, según la clasificación de Brunauer *et al.* (1940). Otros autores, como Arslan-Tontul (2020), Mallek-Ayadi *et al.* (2020), Pentead Rosa *et al.* (2021), Koç & Erbaş (2022), Dushkova *et al.* (2023) y Maftoon Azad *et al.* (2023) reportan que este comportamiento de las isotermas resulta muy común en productos de origen biológico, como las frutas, semillas y cereales.

Según Toğrul & Arslan (2007), la isoterma de sorción de humedad se divide en tres partes, que dependen del intervalo de la actividad de agua; esta división lleva a una zona A ($a_w: 0 - 0,2$), una zona B ($a_w: 0,2 - 0,7$) y una zona C ($a_w: 0,7 - 1,0$). La zona A de la isoterma es escenario de la adsorción de monocapa, donde el agua

molecular se encuentra fuertemente unida a los sitios polares de la matriz alimentaria, mediante enlaces de hidrógeno (Li *et al.* 2021). Los resultados de esta investigación muestran que en la zona A se presentaron valores de monocapa, donde el agua molecular se une al contenido crítico de humedad, generando una excelente estabilidad de almacenamiento de las harinas.

En la zona B, se evidenció una correlación casi lineal entre la humedad de equilibrio y la actividad de agua, atribuible a las transformaciones estructurales inducidas en la matriz alimentaria y a la interacción del agua con los componentes del alimento (Arslan-Tontul, 2020). En esta fase, se llevó a cabo un proceso de adsorción en múltiples capas, durante el cual, las moléculas de agua se organizaron secuencialmente para ocupar los microporos presentes en la estructura del alimento. De manera análoga a lo observado en la región A, el agua adsorbida, en esta etapa, no se encuentra en estado libre, lo que restringe su disponibilidad para participar en reacciones bioquímicas.

En la zona C, las moléculas de agua tienden a penetrar en los poros y quedan atrapadas de forma mecánica en el espacio vacío y, posteriormente, logran condensarse en agua líquida. El agua de esta zona se conoce como agua libre y las moléculas de agua son lo suficientemente activas como para participar en la reacción bioquímica y microbiológica (Sawhney *et al.* 2011). Con una actividad del agua superior a 0,6, un leve incremento en la actividad del agua llevó a que la adsorción sea mayor; esto indica, que en $a_w > 0,6$ las harinas se tornan inestables y son muy susceptibles al deterioro.

Los procesos de sorción están relacionados estrechamente con la composición y la estructura química del material. En el tratamiento realizado a $T = 40$ °C ($a_w = 0,9$), se obtuvo una adsorción de agua de 0,31, 0,29 y 0,13 g H₂O/g sólido (m.s.) en las harinas tipo 1, 2 y 3, respectivamente, lo que sugiere que, al desgrasar e hidrolizar la proteína, la harina de tarwi se torna menos higroscópica. Aunque, la harina con la proteína entera presentó una adsorción cercana a la harina sin desgrasar.

Estos resultados siguen siendo superiores a otros productos, como la quinua, con 0,16 g H₂O/g sólido (m.s.) (Arslan-Tontul, 2021), en condiciones de a_w altas (0,9) y temperatura de 35 °C. La baja adsorción de la harina tipo 3 se puede explicar por el hecho de que la hidrofobicidad superficial de los hidrolizados se incrementa, pues la hidrólisis de los enlaces peptídicos en las proteínas incrementa el número de sitios hidrofóbicos al exponer el interior de las proteínas (Jo *et al.* 2020). Durante la hidrólisis, la degradación enzimática de proteínas implica cambios estructurales a medida en que la proteína se convierte en unidades peptídicas más pequeñas (Kristinsson & Rasco, 2000), lo que, a su vez, aumenta el contenido de nitrógeno α -amino. Este cambio en el contenido de nitrógeno α -amino se produce porque la enzima muestra distintas especificidades para diferentes sustratos proteicos. Park *et al.* (2004) reportaron que la especificidad de la enzima por un sustrato se ve afectada, tanto por el tamaño molecular del polímero como a las diferentes actividades catalíticas de la enzima.

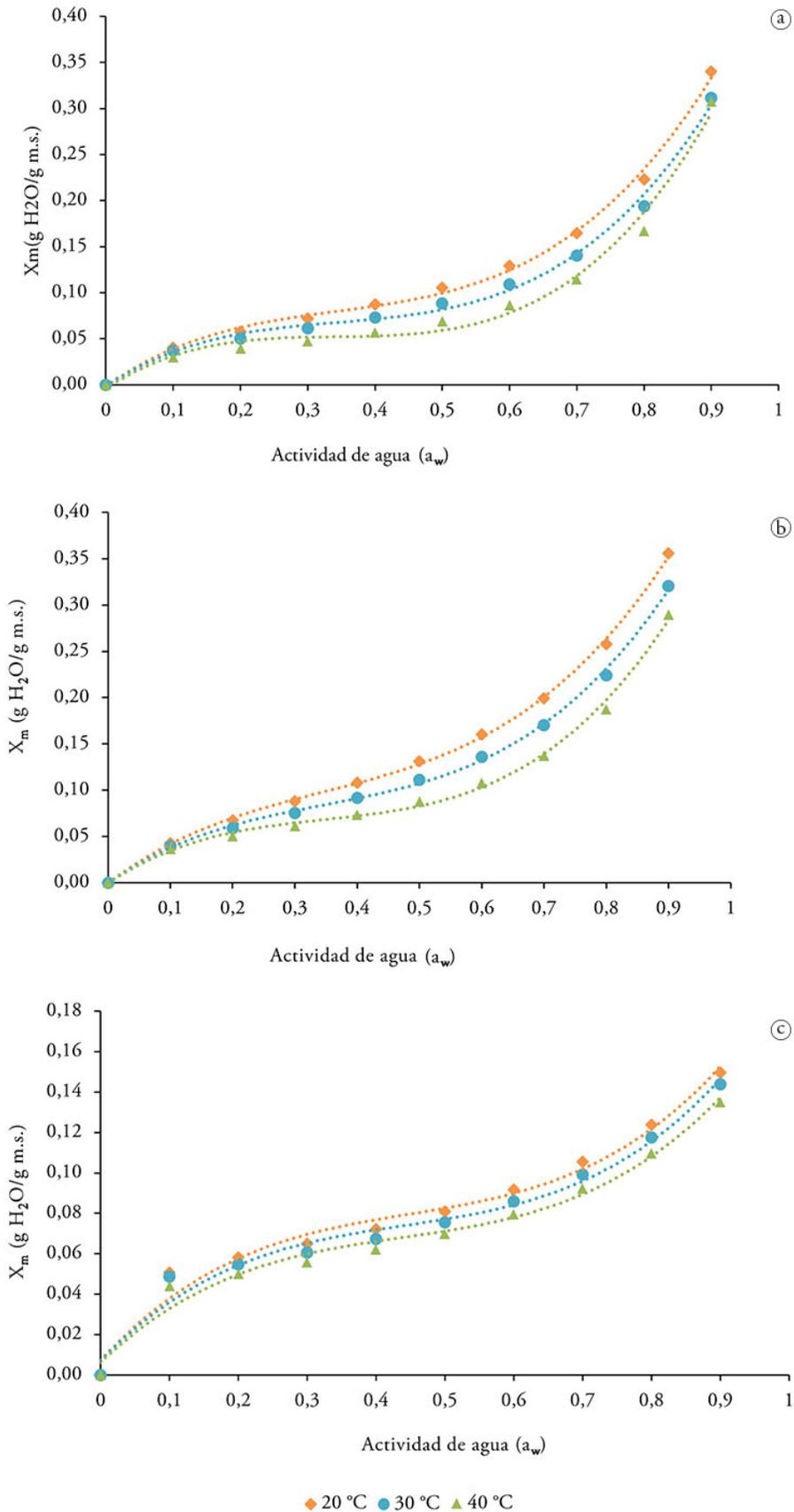


Figura 1. Humedad de equilibrio (X_m) de las isothermas de harina de tarwi en función de la temperatura y la actividad de agua (a_w). (a) Tipo 1: deslupinizada; (b) Tipo 2: desgrasada; (c) Tipo 3: hidrolizada.

En la tabla 2, se observa que del modelo GAB, en todos los tratamientos, se encontró valores de coeficiente de determinación (R^2) muy próximos a 1 y error medio relativo (EMR), inferior al 10 %, lo que sugiere que el modelo explica casi toda la variabilidad de los datos experimentales. Un EMR inferior al 10 % indica que el error entre lo predicho por el modelo y lo observado experimentalmente es relativamente bajo, lo que refuerza la calidad del ajuste.

Determinación de la humedad de monocapa. El contenido de humedad de la monocapa (X_0) representa la cantidad de agua

que se encuentra fuertemente absorbida en los sitios específicos de la superficie del alimento; es, por tanto, considerado un valor importante para garantizar la estabilidad de los alimentos durante el almacenamiento, especialmente, cuando va a ser a largo plazo. Por debajo de este valor, el agua adsorbida no puede ser utilizada como disolvente, por lo que se minimiza la velocidad de las reacciones de deterioro; esto incluye, la oxidación de lípidos y la actividad enzimática (Sánchez-Riaño *et al.* 2022).

Tabla 2. Variables del modelo GAB para las isotermas de los tres tipos de harina de tarwi.

Harina de tarwi	Variables ^a	Temperatura (°C)		
		20	30	40
Tipo 1	X_0	0,062 ± 0,001	0,050 ± 0,001	0,037 ± 0,002
	C_G	14,340 ± 2,081	20,292 ± 3,845	33,993 ± 26,054
	K_G	0,911 ± 0,008	0,936 ± 0,008	0,979 ± 0,008
	R^2	0,999 ± 0,001	0,998 ± 0,001	0,996 ± 0,001
	EMR (%)	5,452 ± 1,021	7,189 ± 0,443	8,869 ± 0,906
Tipo 2	X_0	0,087 ± 0,001	0,070 ± 0,001	0,050 ± 0,002
	C_G	8,764 ± 0,513	10,944 ± 0,877	19,617 ± 3,842
	K_G	0,847 ± 0,005	0,875 ± 0,004	0,919 ± 0,014
	R^2	0,999 ± 0,001	0,998 ± 0,001	0,996 ± 0,001
	EMR (%)	5,218 ± 0,609	5,555 ± 0,827	5,990 ± 1,780
Tipo 3	X_0	0,052 ± 0,001	0,048 ± 0,001	0,044 ± 0,001
	C_G	114,306 ± 23,612	231,364 ± 108,841	156,171 ± 49,642
	K_G	0,724 ± 0,008	0,741 ± 0,006	0,748 ± 0,005
	X_0	0,999 ± 0,001	0,998 ± 0,001	0,996 ± 0,001
	EMR (%)	4,837 ± 0,499	5,679 ± 0,657	4,976 ± 0,993

^a X_0 expresado como g H₂O/g de sólidos seco. Valores obtenidos de tres repeticiones.

En la tabla 2, se presentan las variables de la ecuación de GAB de las isotermas a los tres tipos de harina. Se determinó que el valor de monocapa fue 0,062, 0,05 y 0,037 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, en el mismo orden para la harina tipo 1; en tanto que, para la harina tipo 2 fue 0,087, 0,07 y 0,05 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, en el mismo orden y para la harina tipo 3, se tuvo 0,052, 0,048 y 0,044 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, respectivamente. La cuantificación de monocapa en quinua se reporta 0,0867, 0,0851 y 0,0590 g H₂O/g m.s., a 20, 30 y 40 °C, correspondientemente (Tolaba *et al.* 2004) y en harina de kiwicha, una monocapa de 0,0837 g H₂O/g m.s., a 25 °C (Valdez-Niebla *et al.* 1993); esto sugiere que la harina de tarwi en sus condiciones deslupinizada e hidrolizada es menos higroscópica, característica importante para limitar el crecimiento microbiano. Este comportamiento de la harina deslupinizada se debería a la presencia de fracción lipídica que limita la adherencia del agua del ambiente; en tanto, para la harina hidrolizada, la generación de grupos terminales hidrofóbicos, producto de la acción enzimática. Se determinó, además, que los datos de X_0 para las diversas condiciones de harina difieren estadísticamente entre sí, en función a la temperatura (p-valor < 0.05).

Calor isostérico de sorción, superficie de adsorción, entropía de sorción y energía libre de Gibbs. En la tabla 3, se presentan los valores promedio del calor isostérico de sorción (Q_{st}), el área de adsorción (S), la entropía de sorción (ΔS) y la energía libre de Gibbs (ΔG), para los tres tipos de harina de tarwi evaluados.

Q_{st} es un indicador termodinámico usado para comprender la interacción entre la humedad y los materiales alimentarios, así como para analizar el proceso de secado y la estabilidad de los alimentos, en determinadas condiciones de almacenamiento (Arslan-Tontul, 2020). El calor isostérico neto de sorción se calculó mediante la ecuación de Clausius-Clapeyron en el intervalo de humedad de 0,05 a 0,25 g H₂O/g m.s. Puesto que los valores son positivos, la adsorción en las harinas de tarwi experimentan reacciones de tipo endotérmico. Se evidenció, además, que a contenidos de X_m mayores, los valores de Q_{st} disminuyeron; este efecto ya se había reportado en otros estudios, como los de Tunç & Duman (2007), Mallek-Ayadi *et al.* (2020), Arslan-Tontul (2021) y Sánchez-Torres *et al.* (2021). Esto se puede atribuir al hecho de que, para un bajo

contenido de humedad, existe muchos sitios polares activos en la superficie del material alimenticio que se unen a las moléculas de agua y forman una única capa molecular; por lo tanto, la energía necesaria para eliminar la fuerza del agua unida es relativamente alta. Por su parte, el hecho de tener Q_{st} menores a mayores X_m indica que la energía requerida para unir moléculas de agua es inferior a

la requerida para unir el agua a los componentes de la matriz; es la razón por la que el agua se encuentra en forma libre, cuanto mayor sea a_w . Los valores de Q_{st} para las harinas tipo 1, tipo 2 y tipo 3 fueron 39,306, 34,755 y 40,559 kJ/mol, respectivamente, a la temperatura de 20 °C, disminuyendo a 38,452, 33,901 y 39,704 kJ/mol, respectivamente, a la temperatura de 40 °C.

Tabla 3. Propiedades termodinámicas (Q_{st} , A_s , ΔS y ΔG) para los tres tipos de harina de tarwi.

Harina de tarwi	Temperatura (°C)	Q_{st} (kJ/mol) ^a	A_s (m ² /g m.s.)	ΔS (kJ/kmol·K)	ΔG (kJ/kmol)
Tipo 1	20	39,306 ± 0,184	219,245 ± 4,928	10,487 ± 0,735	0,506 ± 2,485
	30	38,876 ± 0,190	175,044 ± 4,086		0,424 ± 2,569
	40	38,452 ± 0,175	129,400 ± 5,405		0,343 ± 2,652
Tipo 2	20	34,755 ± 0,982	308,864 ± 4,155	24,853 ± 3,347	-4,840 ± 1,015
	30	34,325 ± 0,977	246,628 ± 3,625		-5,094 ± 1,049
	40	33,901 ± 0,954	177,985 ± 7,307		-5,347 ± 1,084
Tipo 3	20	40,559 ± 0,142	185,139 ± 2,008	10,487 ± 0,632	0,506 ± 2,485
	30	40,128 ± 0,121	169,446 ± 1,969		0,424 ± 2,569
	40	39,704 ± 0,137	156,207 ± 1,273		0,343 ± 2,652

^a Los valores de desviación estándar son los mismos en las tres temperaturas, debido a que la pendiente de la ecuación (4) es la misma. Valores obtenidos de tres repeticiones.

Al respecto, Zhu *et al.* (2021) reportaron que los componentes que conforman los alimentos tienen un impacto en el comportamiento de sorción de humedad. La energía de unión entre las moléculas de agua y el material alimentario disminuye al retirar el contenido graso de la harina (tipo 2). Además, el alto calor de sorción de la harina tipo 3 es un indicador de que se requiere una mayor energía para vaporizar el agua de la harina durante un proceso de secado.

El área de la superficie de adsorción (A_s) es un indicador para determinar la capacidad de los materiales alimentarios de absorber humedad, lo que puede afectar la textura, el sabor y la vida útil del producto. El área de superficie de adsorción de las harinas de tarwi se calculó empleando los valores de X_0 , a partir del modelo GAB. Los valores de A_s fueron 219,24, 175,04 y 129,40 m²/g m.s., para la harina tipo 1; 308,86, 246,62 y 177,98 m²/g m.s., para la harina tipo 2 y 185,13, 169,44 y 156,20 m²/g m.s., para la harina tipo 3, todas ellas a condiciones de 20, 30 y 40 °C, correspondientemente. Según indican estos resultados, el área superficial disminuye a medida en que se incrementa la temperatura, debido a que la disponibilidad de área para la unión hidrófila disminuye por la variación física y química, provocada por el intervalo térmico (Fan *et al.* 2015). La adsorción de humedad se ve influenciada por la interacción de la superficie, su estructura y la composición química del material alimenticio (Arslan-Tontul, 2020). Un estudio realizado por Kizzie *et al.* (2021), pone de manifiesto que la temperatura ejerce una influencia importante sobre el desarrollo microbiano y actividad enzimática, lo que desencadena reacciones de deterioro, modificando la composición química del alimento, durante su almacenamiento. Además, se observó que las harinas de tarwi lograron absorber una mayor cantidad de agua a 20 °C, comparada con 40 °C.

Respecto a la entropía de sorción (ΔS), Collazos *et al.* (2020) y Soares Silva *et al.* (2021) indican que está relacionada con el número de sitios de sorción disponibles en un nivel de energía específico y la disposición espacial entre la matriz de agua y alimentos, por lo tanto, es útil para caracterizar el grado de desorden en un sistema determinado. Se evidenció que al incrementar X_m hasta 0,10 g H₂O/g m.s., el valor de ΔS disminuye y luego se incrementa para $X_m > 0,1$. Tendencias similares fueron reportadas por Moreira *et al.* (2008), Collazos *et al.* (2020) y Sánchez-Torres *et al.* (2021).

Cuando la humedad toma valores bajos (< 0,10 g H₂O/g m.s.) existe una pérdida del movimiento rotacional de las moléculas de agua a medida que los sitios de sorción disponibles se van saturando; por lo tanto, los incrementos de la fracción acuosa conducen a un descenso de la entropía y al desorden en el sistema (Kurozawa *et al.* 2015); sin embargo, sucede que si $X_m > 0,10$ g H₂O/g m.s., se observa que la entropía se incrementaba ligeramente, lo cual, se puede atribuir al incremento del contenido de humedad, que permitió que se adsorbieran más moléculas de agua en la multicapa y el agua con menor energía de enlace y, por tanto, con mayor movilidad para la rotación y traslación (Soares Silva *et al.* 2021). El valor promedio de la entropía de adsorción fue más bajo (8,42 kJ/kmol·K) en la harina de tarwi tipo 3, seguido del tipo 1 (10,487 kJ/kmol·K) y el tipo 2 (24,853 kJ/kmol·K). Esto indica que en la harina tipo 1, las moléculas de agua se encuentran más atrapadas e incapaces de favorecer las reacciones de deterioro de la harina.

La energía libre de Gibbs (ΔG) es un parámetro termodinámico, cuyo valor representa la cantidad máxima de energía que se libera durante un proceso, bajo temperatura y presión constantes (Soares Silva *et al.* 2021). Durante la adsorción, ΔG se puede emplear para

REFERENCIAS

estimar la afinidad entre una matriz sólida y el agua; además, de determinar si la sorción de agua obedece a un proceso espontáneo o no. Por lo general, si ΔG es negativo (como el caso de las harinas tipo 2 y 3), el proceso se considera espontáneo; por el contrario, en la harina tipo 1, se considera que el proceso no es espontáneo (McMinn *et al.* 2007). ΔG , para la harina tipo 1, estuvo entre 0,506 – 0,343 kJ/kmol a 20 y 40 °C, respectivamente. Para las harinas tipo 2 y 3 estuvo entre -4,84 – -5,347 kJ/kmol y entre -1,37 – -1,657 kJ/kmol, a 20 y 40 °C.

Los valores negativos de ΔG en las harinas tipo 2 y 3 confirmaron que el proceso de adsorción de agua en las muestras de harina fue espontáneo, es decir, no fue necesario absorber energía del medio ambiente, para garantizar que se produzca la reacción. Resultados similares han sido reportados para granos de quinua (Arslan-Tontul, 2021) y café molido (de Oliveira *et al.* 2017). Por lo tanto, la harina tipo 1 requirió energía para la reacción, pues las moléculas de agua estaban más fuertemente confinadas a la matriz del alimento a niveles bajos de humedad (Collazos *et al.* 2020; López-Vidaña *et al.* 2021).

Como conclusión, se determinó la presencia de agua en el equilibrio para los tres tipos de harina de tarwi (Tipo 1: deslupinizada, Tipo 2: desgrasada y Tipo 3: hidrolizada), como dependencia de la a_w a 20, 30 y 40 °C. Se observó que la humedad de equilibrio incrementó su valor al elevar la actividad de agua y disminuyó, cuando a a_w constante se incrementó la temperatura. En todos los casos, las isothermas exhibieron un comportamiento de configuración II, según tipología de Brunauer, con una forma sigmoidal. El modelo GAB se ajustó adecuadamente a los datos experimentales (R^2 cercano a 1). El calor isostérico en el intervalo estudiado (0,5 – 0,25 g H₂O/g m.s.) fue mayor en la harina Tipo 3; además, en todos los casos fue positivo y disminuyó al incrementar la temperatura. El área de adsorción fue superior en la harina Tipo 2, puesto que está relacionada con la monocapa, disminuyendo con el incremento de temperatura. La entropía también fue mayor en la harina Tipo 2, donde la movilidad molecular del agua fue mayor. La energía libre de Gibbs fue positiva para la harina Tipo 1, disminuyendo al incrementar la temperatura; además, en las harinas tipo 2 y 3, el valor negativo de la energía libre de Gibbs indicó que el proceso fue espontáneo.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Cooperativa Agraria Ecológica Markahuamachuco, por proporcionarnos los granos de tarwi para esta investigación. **Conflicto de interés.** Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses con relación a la publicación de este artículo. Parte de esta investigación es el resultado del trabajo de pregrado para optar el título profesional de Santos Martín Briceño Sevillano. **Financiación.** El trabajo se realizó con recursos de la Universidad Nacional de Trujillo-Escuela de Ingeniería Agroindustrial-Filial Huamachuco. **Contribución de autores.** Rodolfo Moisés Vegas Niño: conceptualización, metodología y redacción; Luberto Marceliano Sánchez: validación, análisis formal y supervisión; Santos Martín Briceño Sevillano: Recursos, investigación y curación de datos.

- ABATI, J.; ZUCARELI, C.; BRZEZINSKI, C.; LOPES, I.; KRZYZANOWSKI, F.; MORAES, L.; HENNING, F. 2021. Water absorption and storage tolerance of soybean seeds with contrasting seed coat characteristics. *Acta Scientiarum Agronomy*. 44(1):e53096. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53096>
- ALAMRI, M.; MOHAMED, A.; HUSSAIN, S.; IBRAHEEM, M.; ABDO QASEM, A. 2018. Determination of moisture sorption isotherm of crosslinked millet flour and oxirane using GAB and BET. *Journal of Chemistry*. 2018:2369762. <https://doi.org/10.1155/2018/2369762>
- ARSLAN-TONTUL, S. 2020. Moisture sorption isotherm, isosteric heat and adsorption surface area of whole chia seeds. *Food Science and Technology*. 119:108859. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108859>
- ARSLAN-TONTUL, S. 2021. Moisture sorption isotherm and thermodynamic analysis of quinoa grains. *Heat and Mass Transfer*. 57(3):543-550. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02978-8>
- AYALA APONTE, A.A. 2016. Propiedades termodinámicas de humedad de sorción en harina de yuca. *DYNA*. 83(197):138-144. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.51543>
- AZHAR, M.; ABD HASHIB, S.; IBRAHIM, U.; MD ZAKI, N.; AHMAD ZAMANHURI, N.; ABD RAHMAN, N. 2021. Moisture sorption isotherm and thermodynamic properties of L. (CAL) powder. *Chemical Engineering Communications*. 208(4):573-582. <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1780213>
- BERRU, L.; GLORIO-PAULET, P.; BASSO, C.; SCARAFONI, A.; CAMARENA, F.; HIDALGO, A.; BRANDOLINI, A. 2021. Chemical composition, tocopherol and carotenoid content of seeds from different Andean Lupin (*Lupinus mutabilis*) ecotypes. *Plant Foods for Human Nutrition*. 76(1):98-104. <https://doi.org/10.1007/s11130-021-00880-0>
- BHANDARI, B.; ADHIKARI, B. 2008. Water activity in food processing and preservation. En: Chen, X.D.; Mumumdar, A.S. (Eds.), *Drying technologies in food processing*. Blackwell Publishing, p.55-89.
- BRUNAUER, S.; DEMING, L.; DEMING, W.; TELLER, E. 1940. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Journal of the American Chemical Society*. 62(7):1723-1732. <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>
- CARVAJAL-LARENAS, F.; LINNEMANN, A.; NOUT, M.; KOZIOL, M.; VAN BOEKEL, M. 2016. *Lupinus mutabilis*: Composition, uses, toxicology, and debittering. *Critical*

- Reviews in Food Science and Nutrition. 56(9):1454-1487. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.772089>
- CHALAMPUENTE-FLORES, D.; MOSQUERA-LOSADA, M.; DE RON, A.; TAPIA BASTIDAS, C.; SØRENSEN, M. 2023. Morphological and ecogeographical diversity of the Andean Lupine (*Lupinus mutabilis* Sweet) in the high andean region of Ecuador. *Agronomy*. 13(8):2064. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082064>
- CHEN, J.; KHAJE, M.; MEHDI, M.; ALTALBAWY, F.; TURKI, A.; ALI EFTEKHARI, S.; HASHEMIAN, M.; TOGHRAIE, D.; FADEL, Z. 2023. Transverse vibration analysis of double-walled carbon nanotubes in an elastic medium under temperature gradients and electrical fields based on nonlocal Reddy beam theory. *Materials Science and Engineering. B*. 291:116220. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116220>
- CHENG, X.; LING, P.; IQBAL, M.; LIU, F.; XU, J.; WANG, X. 2023. Water adsorption properties of microalgae powders: Thermodynamic analysis and structural characteristics. *Journal of Stored Products Research*. 101:102093. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102093>
- COLLAZOS ESCOBAR, G.A.; GUTIERREZ GUZMAN, N.; VAQUIRO HERRERA, H.A.; AMOROCHO CRUZ, C. 2020. Moisture dynamic sorption isotherms and thermodynamic properties of parchment specialty coffee (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*. 15:e151684. <https://doi.org/10.25186/v15i.1684>
- CÓRDOVA-RAMOS, J.; GLORIO-PAULET, P.; CAMARENA, F.; BRANDOLINI, A.; HIDALGO, A. 2020. Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet): Processing effects on chemical composition, heat damage, and in vitro protein digestibility. *Cereal Chemistry*. 97(4):827-835. <https://doi.org/10.1002/cche.10303>
- CZUBINSKI, J.; GRYGIER, A.; SIGER, A. 2021. *Lupinus mutabilis* seed composition and its comparison with other lupin species. *Journal of Food Composition and Analysis*. 99:103875. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103875>
- DE OLIVEIRA, G.; CORRÊA, P.; OLIVEIRA, A.; BAPTESTINI, F.; VARGAS, G. 2017. Roasting, grinding, and storage impact on thermodynamic properties and adsorption isotherms of Arabica Coffee. *Journal of Food Processing and Preservation*. 41(2):e12779. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12779>
- DUSHKOVA, M.; DIMOV, M.; LAZAROV, L.; PENCHEVA, M.; KOSTOVA, I.; DAMYANOVA, S.; MENKOV, N.; STOYANOVA, A.; ERCISLI, S.; ASSOUGUEM, A.; ALINA, R.; AYVAZ, D.; ULLAH, R.; BARI, A. 2023. Physical, chemical, sorption and microbiological characteristics of fennel fruits. *Heliyon*. 9(9):e19127. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19127>
- ESFE, M.; ESMAILY, R.; KHABAZ, M.; ALIZADEH, A.; PIRMORADIAN, M.; RAHMANIAN, A.; TOGHRAIE, D. 2023. A novel integrated model to improve the dynamic viscosity of MWCNT-Al₂O₃ (40:60)/Oil 5W50 hybrid nano-lubricant using artificial neural networks (ANNs). *Tribology International*. 178:108086. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108086>
- FAKHFAKH, R.; MIHOUBI, D.; KECHAOU, N. 2018. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of bovine leather. *Heat and Mass Transfer*. 54(4):1163-1176. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2223-0>
- FAN, K.; CHEN, L.; WEI, X.; HE, J.; YAN, F. 2015. Moisture adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Auricularia auricula*. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6):1534-1541. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12379>
- GARCÍA, J.; CÁRCEL, J.; CLEMENTE, G.; MULET, A. 2008. Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats. *Food Science and Technology*. 41(1):18-25. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.02.010>
- GROSS, R.; VON BAER, E.; KOCH, F.; MARQUARD, R.; TRUGO, L.; WINK, M. 1988. Chemical composition of a new variety of the Andean lupin (*Lupinus mutabilis* cv. Inti) with low-alkaloid content. *Journal of Food Composition and Analysis*. 1(4):353-361. [https://doi.org/10.1016/0889-1575\(88\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0889-1575(88)90035-X)
- GULISANO, A.; ALVES, S.; MARTINS, J.; TRINDADE, L. 2019. Genetics and breeding of *Lupinus mutabilis*: An emerging protein crop. *Frontiers in Plant Science*. 10:1385. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01385>
- JO, K.; HONG, K.; SUH, H. 2020. Effects of the whey protein hydrolysates of various protein enzymes on the proliferation and differentiation of 3T3-E1 osteoblasts. *Preventive Nutrition and Food Science*. 25(1):71-77. <https://doi.org/10.3746/pnf.2020.25.1.71>
- KAROUI, I.; TERRAS, D.; YEDDES, W.; HAMMAMI, M.; ABDERRABBA, M. 2023. Formulation of pasta enriched with protein-rich lupine (*Lupinus mutabilis* Sweet) and wheat bran using mixture design approach. *Journal of Food Science*. 88(10):4001-4014. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16736>
- KIZZIE, N.; DABIE, K.; KYEI, B.; AMPOFO, J.; ZAHN, S.; JAROS, D.; ROHM, H. 2021. Storage temperature of tiger nuts (*Cyperus esculentus* L) affects enzyme

- activity, proximate composition and properties of lactic acid fermented tiger nut milk derived thereof. *Food Science and Technology*. 137:110417. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110417>
- KOÇ, A.; ERBAŞ, M. 2022. Investigation of sorption isotherms of wheat germ for its effect on lipid oxidation. *Journal of Food Science*. 87(5):2072-2082. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16133>
- KOUA, B.; KOFFI, P.; GBAHA, P.; TOURE, S. 2014. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). *Journal of Food Science and Technology*. 51(9):1711-1723. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0687-y>
- KRISTINSSON, H.; RASCO, B. 2000. Fish protein hydrolysates: Production, biochemical, and functional properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 40(1):43-81. <https://doi.org/10.1080/10408690091189266>
- KUROZAWA, L.; DE OLIVEIRA, R.; HUBINGER, M.; PARK, K. 2015. Thermodynamic properties of water desorption of papaya. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39(6):2412-2420. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12491>
- LANCELOT, E.; FONTAINE, J.; GRUA, J.; LE-BAIL, A. 2021. Effect of long-term storage conditions on wheat flour and bread baking properties. *Food Chemistry*. 346:128902. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128902>
- LEWICKI, P.P. 1997. The applicability of the GAB model to food water sorption isotherms. *International Journal of Food Science & Technology*. 32(6):553-557. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb02131.x>
- LI, X.; HAN, X.; TAO, L.; JIANG, P.; QIN, W. 2021. Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of Chinese wheat bran products added to rice to increase its dietary fibre content. *Grain & Oil Science and Technology*. 4(4):149-164. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.09.001>
- LÓPEZ-VIDAÑA, E.; CASTILLO TÉLLEZ, M.; PILATOWSKY FIGUEROA, I.; SANTIS ESPINOSA, L.; CASTILLO-TÉLLEZ, B. 2021. Moisture sorption isotherms, isosteric heat, and Gibbs free energy of stevia leaves. *Journal of Food Processing and Preservation*. 45(1):e15016. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15016>
- MAFTOON AZAD, N.; ALIZADEH, A.; KAZEMIYAN JAHROMI, A.; EHSAN TORKAMANI, A.; BAGHAEL, S.; MIRAZIMI ABARGHUEI, F. 2023. Effects of thermodynamic properties of rice and ambient conditions on moisture migration during storage at naturally ventilated warehouses. *Arabian Journal of Chemistry*. 16(7):104761. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104761>
- MALLEK-AYADI, S.; BAHLOUL, N.; KECHAOU, N. 2020. Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. *Food Science and Technology*. 131:109727. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109727>
- MARTÍN-SANTOS, J.; VIOQUE, M.; GÓMEZ, R. 2012. Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat flour. Calculation of net isosteric heat. *International Journal of Food Science & Technology*. 47(7):1487-1495. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02996.x>
- MCMINN, W.; AL-MUHTASEB, A.; MAGEE, T. 2005. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. *Food Research International*. 38(5):505-510. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.11.004>
- MCMINN, W.; MAGEE, T. 2003. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering*. 60(2):157-165. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00036-0)
- MCMINN, W.; MCKEE, D.; MAGEE, T. 2007. Moisture adsorption behaviour of oatmeal biscuit and oat flakes. *Journal of Food Engineering*. 79(2):481-493. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.009>
- MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO. 2023. Producción de tarwi de Perú alcanzó las 16.000 toneladas en 2023. Disponible desde Internet en: <https://agraria.pe/noticias/produccion-de-tarwi-de-peru-alcanzo-las-16-000-toneladas-en--36884>
- MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.; VALLEJO, N. 2008. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. *Journal of Food Engineering*. 88(4):514-521. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.011>
- NOVOA, F. 2019. Simulation of the temperature of barley during its storage in cylindrical silos. *Mathematics and Computers in Simulation*. 157:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.004>
- OUAABOU, R.; ENNAHLI, S.; DI LORENZO, C.; HANINE, H.; BAJOUB, A.; LAHLALI, R.; IDLIMAM, A.; AIT OUBAHOU, A.; MESNAOUI, M. 2021. Hygroscopic properties of sweet cherry powder: Thermodynamic properties and microstructural changes. *Journal of Food Quality*. 2021(1):3925572. <https://doi.org/10.1155/2021/3925572>
- PANIGRAHI, S.; FIELKE, J.; SINGH, C. 2022. Evaluating isotherms and isosteric heat utilization during sorption characteristics of feed barley. *Journal of Stored Products Research*. 96:101955. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101955>

- PARK, P.; JUNG, W.; KIM, S.; JUN, S. 2004. Purification and characterization of an antioxidative peptide from enzymatic hydrolysate of yellowfin sole (*Limanda aspera*) frame protein. *European Food Research and Technology*. 219(1):20-26. <https://doi.org/10.1007/s00217-004-0882-9>
- PENTEADO ROSA, D.; RODRIGUES EVANGELISTA, R.; BORGES MACHADO, A.; RIBEIRO SANCHES, M.; TELIS-ROMERO, J. 2021. Water sorption properties of papaya seeds (*Carica papaya* L.) formosa variety: An assessment under storage and drying conditions. *Food Science and Technology*. 138:110458. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110458>
- ROSA, G.; MORAES, M.; PINTO, L. 2010. Moisture sorption properties of chitosan. *Food Science and Technology*. 43(3):415-420. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.09.003>
- SÁNCHEZ-RIAÑO, A.; SOLANILLA-DUQUE, J.; VÁQUIRO-HERERA, H. 2022. Desorption and thermophysical properties of feijoa pulp as affected by temperature and moisture content. *International Journal of Food Properties*. 25(1):2089-2106. <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2125008>
- SÁNCHEZ-TORRES, E.; ABRIL, B.; BENEDITO, J.; BON, J.; GARCÍA-PÉREZ, J. 2021. Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. *Food Science and Technology*. 149:111857. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111857>
- SAWHNEY, I.; SARKAR, B.; PATIL, G. 2011. Moisture sorption characteristics of dried acid casein from buffalo skim milk. *Food Science and Technology*. 44(2):502-510. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.07.009>
- SIMIONIUC, D.; SIMIONIUC, V.; TOPA, D.; VAN DEN BERG, M.; PRINS, U.; BEBELI, P. J.; GABUR, I. 2021. Assessment of andean lupin (*Lupinus mutabilis*) genotypes for improved frost tolerance. *Agriculture*. 11(2):155. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020155>
- SOARES SILVA, K.; POLACHINI, T.; LUNA-FLORES, M.; LUNA-SOLANO, G.; RESENDE, O.; TELIS-ROMERO, J. 2021. Sorption isotherms and thermodynamic properties of wheat malt under storage conditions. *Journal of Food Process Engineering*. 44(9). <https://doi.org/10.1111/jfpe.13784>
- TOĞRUL, H.; ARSLAN, N. 2007. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of walnut kernels. *Journal of Stored Products Research*. 43(3):252-264. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2006.06.006>
- TOLABA, M.; PELTZER, M.; ENRIQUEZ, N.; LUCÍA POLLIO, M. 2004. Grain sorption equilibria of quinoa grains. *Journal of Food Engineering*. 61(3):365-371. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00143-2)
- TUNÇ, S.; DUMAN, O. 2007. Thermodynamic properties and moisture adsorption isotherms of cottonseed protein isolate and different forms of cottonseed samples. *Journal of Food Engineering*. 81(1):133-143. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.015>
- VALDEZ-NIEBLA, J.; PAREDES-LÓPEZ, O.; VARGAS-LÓPEZ, J.M.; HERNÁNDEZ-LÓPEZ, D. 1993. Moisture sorption isotherms and other physicochemical properties of nixtamalized amaranth flour. *Food Chemistry*. 46(1):19-23. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(93\)90069-R](https://doi.org/10.1016/0308-8146(93)90069-R)
- WAN, J.; DING, Y.; ZHOU, G.; LUO, S.; LIU, C.; LIU, F. 2018. Sorption isotherm and state diagram for indica rice starch with and without soluble dietary fiber. *Journal of Cereal Science*. 80:44-49. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.003>
- ZHU, G.; JIN, Q.; LIU, Y.; LIN, Y.; WANG, J.; LI, X. 2021. Moisture sorption and thermodynamic properties of *Camellia oleifera* seeds as influenced by oil content. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 14(1):251-258. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211401.5457>