

Evaluation of chickpea (*Cicer arietinum*) rehydration in hard waters

Jesús Alexander Sánchez-González¹ , Guillermo Alberto Linares Lujan¹ , Leslie Cristina Lescano Bocanegra¹ ,

Juan Carlos Solano-Gaviño¹ , Karla Margielly Zavaleta-Guzman¹ 

¹Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jsanchezg@unitru.edu.pe, glinares@unitru.edu.pe, llescano@unitru.edu.pe, jsolano@unitru.edu.pe; kzavaletag@unitru.edu.pe

Abstract– *This research aimed to determine the effect of water hardness on the rehydration of chickpea grains (Cicer arietinum). Two variables were evaluated using a Rotatable Central Composite Design, with 11 treatments combining temperatures ranging from 21°C to 41°C, additionally, calcium carbonate concentrations between 163 ppm and 525 ppm were tested. The kinetic parameters of 5 concave rehydration models were determined, and significant effects were found in the parameters of the Peleg, Page, First Order, and Ibarz-González-Barbosa Cánovas models, which describe the rehydration rate parameters. On the other hand, a directly proportional relationship between temperature and mass transfer kinetic parameters was demonstrated, while hardness affects saturation parameters.*

Keywords– *Cicer arietinum, rehydration, Temperature, water hardness, mass transfer.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Evaluación de la rehidratación de garbanzos (*Cicer arietinum*) en aguas duras

Jesús Alexander Sánchez-González¹ , Guillermo Alberto Linares Lujan¹ , Leslie Cristina Lescano Bocanegra¹ ,
Juan Carlos Solano-Gaviño¹ , Karla Margielly Zavaleta-Guzman¹ 

¹Universidad Nacional de Trujillo, Perú, jsanchezg@unitru.edu.pe, glinares@unitru.edu.pe, llescano@unitru.edu.pe, jsolano@unitru.edu.pe; kzavaletag@unitru.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Abstract– *This research aimed to determine the effect of water hardness on the rehydration of chickpea grains (Cicer arietinum). Two variables were evaluated using a Rotatable Central Composite Design, with 11 treatments combining temperatures ranging from 21°C to 41°C, additionally, calcium carbonate concentrations between 163 ppm and 525 ppm were tested. The kinetic parameters of 5 concave rehydration models were determined, and significant effects were found in the parameters of the Peleg, Page, First Order, and Ibarz-González-Barbosa Cánovas models, which describe the rehydration rate parameters. On the other hand, a directly proportional relationship between temperature and mass transfer kinetic parameters was demonstrated, while hardness affects saturation parameters.*

Keywords– *Cicer arietinum, rehydration, Temperature, water hardness, mass transfer.*

Resumen– *El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la dureza del agua en la rehidratación de granos de garbanzo (Cicer arietinum). Se evaluaron dos variables bajo un Diseño Central Compuesto Rotable, con 11 tratamientos combinando las temperaturas entre 21°C y 41°C, adicionalmente las concentraciones de carbonato de calcio entre 163 ppm y 525 ppm; se determinaron los parámetros cinéticos de 5 modelos de rehidratación cóncavos, se encontraron efectos significativos en los parámetros de los modelos de: Peleg, Page, Primer Orden y el modelo de Ibarz-González-Barbosa Cánovas, los cuales describen los parámetros de velocidad de rehidratación. Por otro lado, se demuestra la relación directamente proporcional entre la temperatura y los parámetros cinéticos de transferencia de masa, por otro lado, la dureza afecta a los parámetros de saturación.*

Palabras clave– *Cicer arietinum, rehidratación, Temperatura, dureza del agua, transferencia de masa.*

Actualmente en el sector agroindustrial, se fijan diferentes destinos para las legumbres: la comercialización de granos secos; su molturación en harina; el procesamiento en conserva u otros prototipos agroindustriales. Para lo cual es importante saber cuáles serán las características más adecuadas para tener un proceso óptimo.

La inmersión en agua es ampliamente utilizada en la transformación de los diversos granos secos de cereales y legumbres por muchas razones, puesto que la rehidratación es necesaria en el procesamiento: cocción, extracción, fermentación, germinación y malteo. La rehidratación de los granos antes de cocinarlos ayuda a suavizar la estructura de los granos y así se reduce el tiempo de cocción [1].

Además, la rehidratación mejora la gelatinización homogénea del almidón y la desnaturalización homogénea de proteínas durante la cocción [2] por lo tanto, se obtiene una textura similar en el grano entero. Además, la transferencia de calor a través del grano durante la cocción es potenciado por el agua absorbida, mejorando así la inactivación de factores anti nutricionales [3] como inhibidores de proteasas, lectinas, saponinas, vicinas, fitatos, alcaloides y oligosacáridos no digeribles [4].

Debido a esto es grande el interés en rehidratar a los granos, como por ejemplo al garbanzo (*Cicer arietinum*) que tiene un alto contenido en fibra, es rico en vitaminas B1, B2, B9, C E y K; además contiene minerales como calcio, zinc, magnesio, hierro y fósforo que ayudan a mejorar las defensas del organismo [5]. Al ser este grano un producto con características nutricionales elevadas se busca que lograr procesar de manera adecuada y que mantener las propiedades, de ahí que como ya mencionamos la rehidratación es una alternativa si se quiere procesar este grano en enlatados. En consecuencia, el proceso de rehidratación es de gran importancia en la industrialización de granos. Sin embargo, este paso es un proceso, que puede llevar muchas horas y utiliza una cantidad considerable de agua. Por tanto, es importante saber las condiciones a las cuales se optimiza el proceso y esta es la razón por la cual se realiza esta investigación [6].

El proceso de rehidratación del grano es un proceso basado en el fenómeno de transferencia de masa. Esta es una operación, en la cual la diferencia de actividad del agua impulsa la transferencia. Es decir, el transporte de agua ocurre desde una matriz de alta concentración efectiva de agua, conocida como

agua de remojo, hacia una matriz de baja concentración efectiva de agua, representada por los granos, mediante el proceso de difusión. Además, la estructura compleja de los granos, formada por diversos tejidos y células, da lugar a la formación de una red de canales con variados tamaños, estructuras, composiciones y zonas de permeabilidad variable, que permiten y afectan el flujo del agua. Por consiguiente, el ingreso de agua hacia los granos también se produce mediante el fenómeno de flujo capilar. Así el proceso de rehidratación no es tan simple como parece y no implica solo mecanismos de transferencia de masa, sino también los de flujo de fluido [7], [8].

Para evaluar la rehidratación se aplican modelos empíricos que se ajustan al comportamiento real de la rehidratación, los modelos matemáticos permitirán hacer un mejor análisis y reconocer, a partir de la bondad de ajuste los efectos de las causas del proceso. Por todas las razones descritas es que el presente trabajo busca evaluar el efecto de la dureza cálcica en el proceso de rehidratación de granos de garbanzo, con la finalidad de ofrecer información del comportamiento del grano de garbanzo en un proceso de rehidratación.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

A. Métodos

Para la rehidratación, los granos de garbanzos fueron dispuestos en aproximadamente 5 g, sumergidos en 100 ml de agua a 23 °C, en recipientes descartables. Al término del tiempo especificado para cada muestra, los garbanzos fueron retirados del agua, y se pesaron, previa eliminación del exceso de agua por escurrido, finalmente las muestras húmedas fueron dispuestas en una estufa (110°C x 24 horas) para determinar el peso seco por gravimetría.

Con los pesos de las muestras se procedió a estimar la humedad en base seca para cada tiempo, se tabularon los datos de humedad en base seca y se procedió a evaluar el ajuste de los modelos matemáticos de la Tabla 1 [9]–[11].

TABLA I
MODELOS MATEMÁTICOS DE REHIDRATACIÓN

Modelo	Ecuación
Peleg	$X = X_0 + \frac{t}{(k_1 + k_2 \cdot t)}$
Lewis (Cinética de Primer Orden)	$X = X_\infty + (X_0 - X_\infty) \cdot e^{-k_3 \cdot t}$
Page	$X = X_\infty + (X_0 - X_\infty) \cdot e^{-k_4 \cdot t^n}$
Weibull	$X = X_\infty \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}\right)$
Ibarz-González-Barbosa-Cánovas	$X = \left(\frac{k_5}{k_6}\right) - \left(\frac{k_5}{k_6} - X_0\right) \cdot e^{-k_6 \cdot t}$

Luego de poner todos los datos reales, se realizó un ajuste con la herramienta SOLVER (de Microsoft Excel), gracias a ello se determinó que el modelo que mejor se adapta al comportamiento de rehidratación de los datos experimentales; para establecer diferencias entre los modelos de rehidratación, primero se procedió a evaluar la bondad de ajuste de los modelos matemáticos usando el valor de regresión R^2 , así como los valores de la desviación de la raíz cuadrada media (RMSD) y los respectivos valores Normalizados (NRMSD); además para valorar la eficacia de la predicción de los modelos, se trazó una gráfica lineal entre los datos experimentales y los datos del modelo (Tabla 2) [12].

Finalmente se aplicó una prueba de Shapiro Wilk a los estadísticos de la tabla 2; para el ajuste de los datos reales a los modelos matemáticos de la Tabla 1.

Se caracterizaron los granos de garbanzo por medición y tamaño. Los granos de garbanzo fueron escogidos por uniformidad y calidad, para mantener la homogeneidad de la muestra respecto a: tamaño y forma. Cada muestra de garbanzos para rehidratación fue de 5 g en cada tratamiento. Se determinó el efecto de la dureza y la temperatura en la rehidratación utilizando un modelo de superficie respuesta [13], Diseño Compuesto Central Rotable (DDCR) en software R.

TABLA II
ECUACIONES PARA EVALUAR LA BONDAD DE AJUSTE DE LOS MODELOS DE HIDRATACIÓN

Ecuación	Condición de ajuste
$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{experimental} - X_{modelo})^2}{n}}$	El valor más bajo de RMSD (Valor de la desviación de la raíz cuadrada media)
$NRMSD = 100 \left(\frac{RMSD}{(X_{MAX,experimental} - X_{MIN,experimental})} \right)$	El valor más bajo de NRMSD (Valor normalizado de RMSD)
$X_{modelo} = a \cdot X_{experimental} + b$ <i>a: pendiente de la recta</i> <i>b: intersección con el eje</i> <i>R²: coeficiente de determinación.</i>	Condición ideal: <i>a = 1</i> <i>b = 0</i> <i>R² = 1</i>

El efecto de la temperatura y la dureza de la solución de rehidratación (o remojo) se examinó durante 24 horas, teniendo en cuenta el peso antes y después de la rehidratación, así como la determinación de la humedad en base seca, la cual fue monitoreada a diferentes tiempos, siendo intervalos cortos de control al inicio y largos al final. Se aplicó un diseño estadístico factorial Compuesto Central Rotacional (DCCR). Se desarrolló bajo el plan factorial completo con tres puntos centrales (k=2),

donde -1 y +1 fueron: 163 y 525 ppm para la dureza cálcica, y 21 y 41°C para la temperatura.

Los modelos matemáticos planteados para la evaluación son aquellos que se ajustaron al resultado de la rehidratación, y fueron modelos cóncavos [1].

B. Materiales

Se utilizaron: Garbanzo (*Cicer arietinum*) procedente de la provincia de Trujillo del Departamento de La Libertad- Perú. Agua destilada de laboratorio. Carbonato de calcio comercial, el cual será diluido en agua y se controlará por diferentes concentraciones de dureza en ppm. Estufa Memmert (200 °C), Balanza analítica Sartorius (200 g).

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las figuras 1 y 2 evidencian cómo evoluciona la rehidratación de los granos de garbanzos en las diferentes combinaciones de Temperatura y concentración de la dureza del agua de rehidratación, se puede notar que todas las combinaciones logran alcanzar una humedad de equilibrio común, sin embargo, el tiempo en el que se alcanza la humedad constante cambia de forma más evidente según la temperatura de rehidratación, acelerando a mayor temperatura y desacelerando a temperaturas inferiores a 25°C. Se ha reportado que algunas legumbres si ven afectada su rehidratación por el contenido inicial de humedad, lo cual se relaciona a los modelos que involucran la humedad inicial en sus desarrollos (ver tabla 1), por otro lado, los modelos que consideran a la humedad de equilibrio, generalmente se asocian a modelos empíricos de secado [7], [14], [15].

En las figuras 1 y 2 se aprecia que la velocidad de agua absorbida está relacionada de forma proporcional directa con el incremento de la temperatura; sin embargo, a los 600 minutos aproximadamente se evidencia que la humedad en base seca ya no aumenta y permanece constante lo cual indica que se alcanzaron condiciones de saturación. Según las figuras 1 y 2, la forma de modelo que mejor se ajusta a la cinética de rehidratación del garbanzo, es la forma cóncava hacia abajo, ya que los primeros instantes de la rehidratación no generan resistencia apreciable, tal como si lo hiciera un modelo sigmoideal [9], [11], [16].

En las figuras 1 y 2 se puede apreciar el comportamiento cóncavo hacia debajo de la curva de los modelos [12], evidenciándose que existen cambios en la velocidad de rehidratación, esto debido a que durante la rehidratación ocurren cambios en la microestructura de los granos, incluye cambios en la organización y distribución de los componentes estructurales del grano, como las células, las fibras y el almidón, así como también disminución en la rigidez y la resistencia de los tejidos [17], [18].

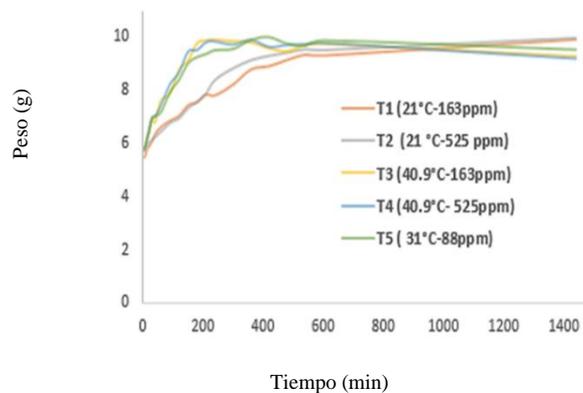


Fig. 1 Variación del peso durante la rehidratación de garbanzo en tratamientos de T1 al T5.

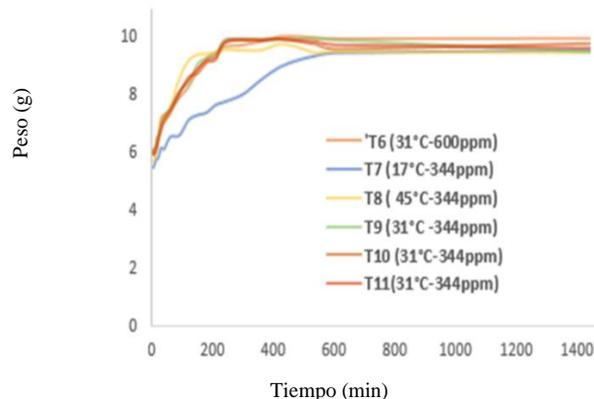


Fig. 2 Variación del peso durante la rehidratación de garbanzo en tratamientos del T6 al T11.

Observando los resultados estadísticos de la figura 3 se puede determinar que todos los modelos se ajustan al comportamiento de la rehidratación, sin embargo, los modelos de Peleg, Page y Weibull presentan mejores indicadores de predicción “b” y “R²”, con respecto al error de predicción, el modelo de Peleg presenta el menor error. En la tabla 3 se observa que los parámetros estadísticos evidencian que los modelos de Peleg y Weibull muestran un adecuado ajuste al proceso de rehidratación de granos de garbanzo a las 5 diferentes combinaciones de temperatura, a partir de la figura 3 confirman que los modelos cóncavos (DCS: Downward concave shape) describen el proceso de rehidratación del garbanzo [1]. Las muestras tuvieron un comportamiento típico con un aumento exponencial respecto a la humedad en base seca, esto producido por el incremento del contenido de agua durante el tiempo de rehidratación en todas las temperaturas, a medida que avanza el proceso. A medida que la ganancia del agua decrecía, la absorción de agua llegó a condiciones de equilibrio, evidenciando una desaceleración de la rehidratación.

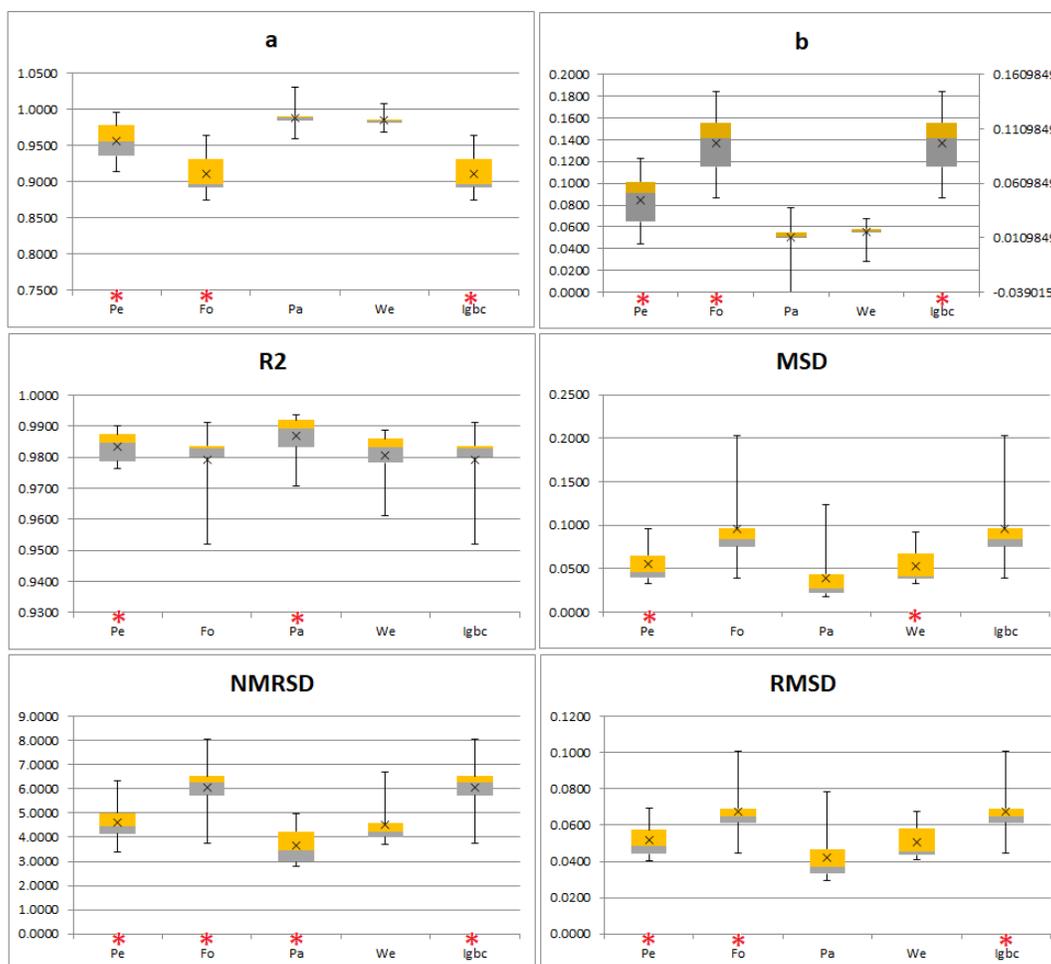


Fig. 3 Evaluación gráfica de los parámetros estadísticos de los modelos de Hidratación a diferentes temperaturas (Pe: Peleg; Fo: Primer Orden cinético; Pa: Page; We: Weibull; Igbc: Ibarz, González, Barbosa-Canovas).

Según la tabla 3, el parámetro k_1 del modelo de Peleg está relacionado con el contenido de humedad de equilibrio, mientras que el modelo de Ibarz, Gonzalez y Barbosa-Canovas utiliza parámetros k_6 y k_7 relacionados con la tasa de rehidratación, en el modelo de Page, los parámetros tienen una interpretación física relacionada con el coeficiente de difusión, la geometría de la muestra y la microestructura del alimento; el parámetro k del modelo de primer orden se relaciona directamente con la tasa de rehidratación [19].

De la tabla 3 y la figura 3, se puede observar que el parámetro estadístico RMSD es bajo respecto al modelos de

Peleg, ya que se utiliza para evaluar la precisión del modelo en la predicción de los valores de humedad de los granos durante el proceso de rehidratación, cuanto menor sea el valor del RMSD, mejor será el ajuste del modelo a los datos experimentales; adicionalmente el parámetro estadístico R^2 , coeficiente de determinación es cercano a la unidad, permite evaluar la capacidad del modelo para explicar la variabilidad de los datos experimentales y proporciona una medida de la calidad del ajuste del modelo [19], [20].

TABLE III
 PARÁMETROS CINÉTICOS DE LOS MODELOS DE REHIDRATACIÓN (PELEG; PRIMER ORDEN; PAGE; WEIBULL; IBARZ, GONZÁLEZ, BARBOSA-CANOVAS) A
 DIFERENTES TRATAMIENTOS COMBINADOS DE DUREZA CÁLIDA (X_1) Y TEMPERATURA (X_2).

	Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
X1	C [ppm]	163	525	163	525	88	600	344	344	344	344	344
X2	T [°C]	21	21	40.9	40.9	31	31	17	45	31	31	31
PELEG	Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
	k1	148.210	136.980	61.083	61.381	56.389	53.385	160.388	67.102	50.290	56.079	53.094
	k2	0.772	0.732	0.702	0.697	0.766	0.746	0.762	0.631	0.752	0.752	0.752
	MSD	0.043	0.081	0.060	0.033	0.047	0.066	0.065	0.096	0.045	0.035	0.035
	RMSD	0.046	0.064	0.055	0.040	0.048	0.057	0.057	0.069	0.048	0.042	0.042
	NMRSD	4.428	6.345	4.449	3.408	4.481	5.352	5.672	4.321	4.669	3.816	3.980
	n	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	min	0.232	0.328	0.288	0.299	0.346	0.424	0.254	0.310	0.367	0.356	0.361
	max	1.281	1.333	1.524	1.485	1.423	1.498	1.260	1.914	1.388	1.445	1.416
	a	0.937	0.914	0.993	0.995	0.952	0.934	0.927	0.994	0.955	0.962	0.959
	b	0.058	0.084	0.008	0.005	0.054	0.076	0.067	0.008	0.052	0.043	0.047
	R2	0.986	0.976	0.982	0.990	0.985	0.980	0.977	0.976	0.985	0.989	0.989
PRIMER ORDEN CINÉTICO	Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
	X _∞	1.223	1.282	1.401	1.413	1.308	1.340	1.240	1.532	1.337	1.321	1.329
	k3	0.005	0.005	0.010	0.010	0.011	0.011	0.004	0.009	0.011	0.011	0.011
	MSD	0.072	0.097	0.066	0.040	0.095	0.150	0.084	0.203	0.091	0.078	0.080
	RMSD	0.060	0.070	0.057	0.045	0.069	0.086	0.065	0.101	0.068	0.063	0.063
	NMRSD	5.718	6.940	4.649	3.759	6.401	8.050	6.458	6.282	6.613	5.751	5.980
	n	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	min	0.232	0.328	0.288	0.299	0.346	0.424	0.254	0.310	0.367	0.356	0.361
	max	1.281	1.333	1.524	1.485	1.423	1.498	1.260	1.914	1.388	1.445	1.416
	a	0.897	0.881	0.954	0.953	0.897	0.875	0.890	0.963	0.895	0.910	0.902
	b	0.096	0.117	0.055	0.056	0.116	0.145	0.102	0.048	0.122	0.103	0.113
	R2	0.985	0.983	0.983	0.991	0.979	0.967	0.981	0.952	0.982	0.983	0.984
PAGE	Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
	X _∞	1.384	1.428	1.439	1.457	1.407	1.502	1.387	1.806	1.417	1.409	1.413
	k4	0.017	0.018	0.018	0.019	0.037	0.047	0.016	0.030	0.037	0.033	0.035
	k5	0.707	0.718	0.851	0.839	0.690	0.620	0.719	0.657	0.707	0.717	0.713
	MSD	0.018	0.050	0.054	0.023	0.027	0.032	0.037	0.123	0.021	0.023	0.017
	RMSD	0.030	0.050	0.052	0.034	0.037	0.040	0.043	0.079	0.033	0.034	0.030
	NMRSD	2.874	4.993	4.191	2.856	3.436	3.697	4.301	4.896	3.196	3.124	2.800
	n	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	min	0.232	0.328	0.288	0.299	0.346	0.424	0.254	0.310	0.367	0.356	0.361
	max	1.281	1.333	1.524	1.485	1.423	1.498	1.260	1.914	1.388	1.445	1.416
	a	0.984	0.960	0.991	0.994	0.989	0.990	0.973	1.030	0.985	0.991	0.987
	b	0.014	0.038	0.010	0.007	0.012	0.011	0.024	-0.039	0.018	0.011	0.014
R2	0.992	0.980	0.984	0.993	0.989	0.988	0.983	0.971	0.992	0.991	0.994	
WEIBULL	Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
	X _∞	1.614	1.711	1.500	1.508	1.463	1.575	1.692	1.929	1.457	1.461	1.458
	α	431.063	435.905	100.133	100.686	105.447	126.622	531.552	202.552	90.070	102.367	95.770
	β	0.491	0.477	0.625	0.630	0.533	0.486	0.475	0.504	0.557	0.557	0.557
	MSD	0.037	0.091	0.070	0.039	0.041	0.044	0.065	0.092	0.039	0.037	0.033
	RMSD	0.043	0.067	0.059	0.044	0.045	0.047	0.057	0.068	0.044	0.043	0.041
	NMRSD	4.089	6.701	4.801	3.726	4.219	4.351	5.677	4.221	4.350	3.924	3.876
	n	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	min	0.232	0.328	0.288	0.299	0.346	0.424	0.254	0.310	0.367	0.356	0.361
	max	1.281	1.333	1.524	1.485	1.423	1.498	1.260	1.914	1.388	1.445	1.416
	a	0.982	0.969	0.985	0.985	0.985	0.987	0.977	1.008	0.981	0.985	0.983
	b	0.016	0.028	0.017	0.018	0.016	0.015	0.020	-0.010	0.021	0.016	0.019
R2	0.983	0.961	0.979	0.989	0.984	0.983	0.969	0.978	0.985	0.987	0.988	
IBARZ, GONZÁLEZ, BARBOSA-CANOVA	Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
	k6	0.006	0.006	0.014	0.014	0.014	0.015	0.005	0.014	0.015	0.014	0.015
	k7	0.005	0.005	0.010	0.010	0.011	0.011	0.004	0.009	0.011	0.011	0.011
	MSD	0.072	0.097	0.066	0.040	0.095	0.150	0.084	0.203	0.091	0.078	0.080
	RMSD	0.060	0.070	0.057	0.045	0.069	0.086	0.065	0.101	0.068	0.063	0.063
	NMRSD	5.718	6.940	4.649	3.759	6.401	8.050	6.458	6.282	6.613	5.751	5.980
	n	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	min	0.232	0.328	0.288	0.299	0.346	0.424	0.254	0.310	0.367	0.356	0.361
	max	1.281	1.333	1.524	1.485	1.423	1.498	1.260	1.914	1.388	1.445	1.416
	a	0.897	0.881	0.954	0.953	0.897	0.875	0.890	0.963	0.895	0.910	0.902
	b	0.096	0.117	0.055	0.056	0.116	0.145	0.102	0.048	0.122	0.103	0.113
	R2	0.985	0.983	0.983	0.991	0.979	0.967	0.981	0.952	0.982	0.983	0.984

La tabla 4 demuestra que los coeficientes relacionados a la tasa de rehidratación: k1, k3, k4 y k6 presentan un buen ajuste (*lack of fit*) aun cuando k1 correspondiente al Modelos de Peleg,

tiene el mayor valor de R²-ajustado. La figura 4 muestra que a menor temperatura (X_2) existe una menor posibilidad de ganancia de peso durante la rehidratación de garbanzo tomando

las variables separadas, debido a que el valor k_1 es muy alto y este a su vez es inversamente proporcional a la tasa de rehidratación; por otro lado, la dureza (X_1) no presenta

significancia frente a la temperatura (X_2) respecto a variación de la constante k_1 [21]–[24].

TABLA IV
COEFICIENTES DEL MODELO DE SEGUNDO ORDEN PARA CADA UNA DE LAS CONSTANTES DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS
 $y = a + bx_1 + cx_2 + d(x_1)^2 + e(x_2)^2 + fx_1x_2$ Y SUS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS

	k1	k2	k3	k4	k5	α	β	k6	k7
<i>a</i>	601.534	0.671	-0.028	-0.120	1.124	2037.039	0.437	-0.037	-0.028
<i>B (block, p>0.05)</i>	-17.598	0.000	0.001	0.015	-0.107	-25.403	-0.057	0.002	0.001
<i>b</i>	-0.263	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.434	0.000	0.000	0.000
<i>c</i>	-28.695	0.012	0.002	0.009	-0.023	-106.665	0.007	0.003	0.002
<i>d</i>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
<i>e</i>	0.395	0.000	0.000	0.000	0.000	1.497	0.000	0.000	0.000
<i>f</i>	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	0.000	0.000	0.000
<i>Multiple R-squared</i>	0.992	0.951	0.978	0.936	0.638	0.982	0.742	0.985	0.978
<i>Adjusted R-squared</i>	0.981	0.877	0.946	0.841	0.095	0.954	0.355	0.964	0.946
<i>Breusch-Pagan test</i>	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05	p>0.05
<i>Durbin-Watson test</i>	p<0.05	p>0.05	p<0.05	p>0.05	p>0.05	p<0.05	p<0.05	p>0.05	p<0.05
<i>lack of fit</i>	p>0.05	p<0.05	p>0.05	p>0.05	p<0.05	p<0.05	p<0.05	p>0.05	p>0.05

La figura 5 demuestra una interacción entre la dureza (X_1) y la temperatura (X_2), que definen la variación de k_2 , constante relacionada inversamente a la capacidad de saturación de los garbanzos, ya que temperaturas entre 25 y 30 °C con 500 ppm de dureza cálcica incrementan la capacidad de saturación del garbanzo. En las figuras 4 y 5 se puede observar que el aumento

de la temperatura del agua puede acelerar la velocidad de absorción de agua en los granos. Esto se debe a que las altas temperaturas aumentan la actividad molecular y la difusión del agua en la estructura celular de los granos [25].

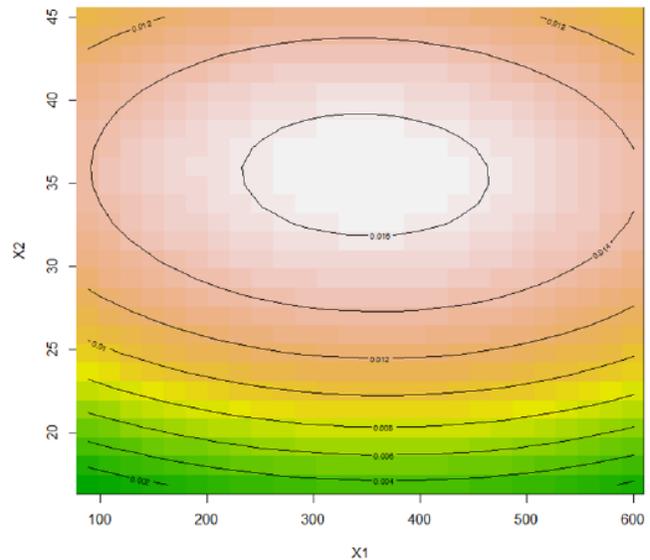
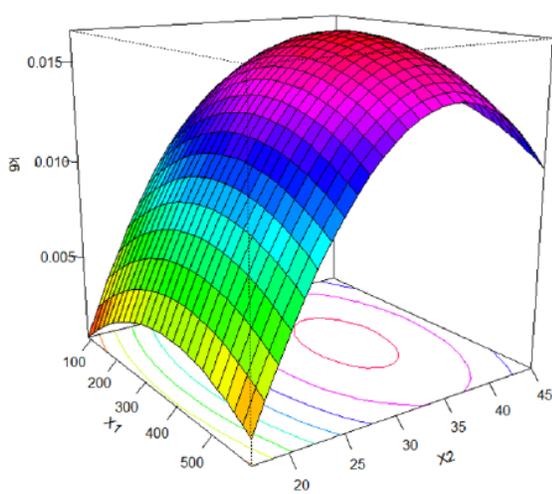


Fig. 4 Modelo de Superficie de Respuesta de la constante cinética k_6 del Modelo de Ibarz, González y Barbosa-Cánovas (x_1 : Concentración de dureza cálcica; x_2 : temperatura de remojo). *Adjusted R-squared*: 0.964

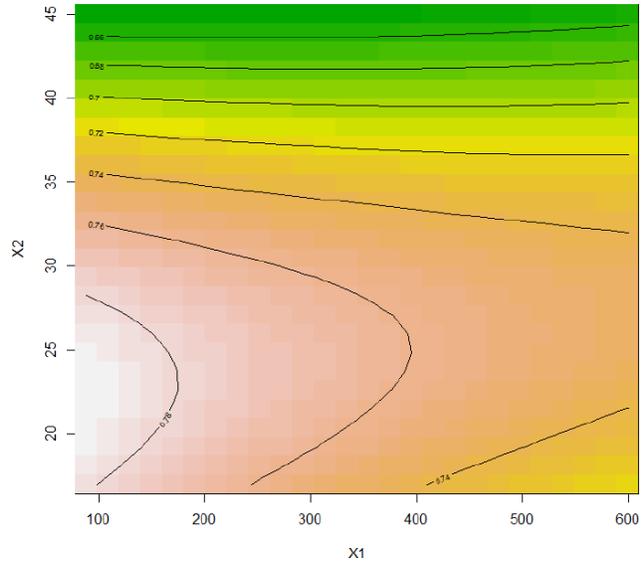
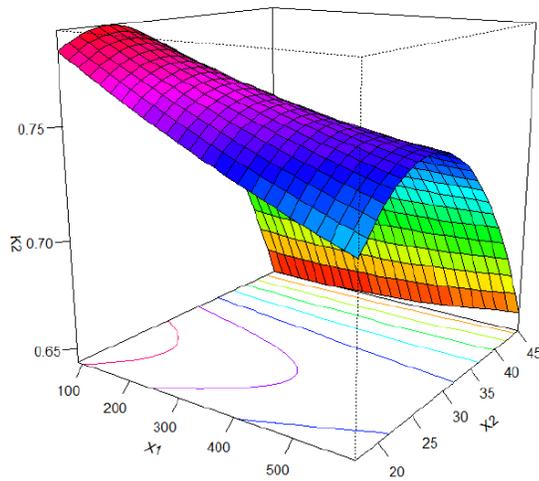


Fig. 5 Modelo de Superficie de Respuesta de la constante cinética k_2 del Modelo de Peleg (x_1 : Concentración de dureza cálcica; x_2 : temperatura de remojo).
Multiple R-squared: 0.9508; Adjusted R-squared: 0.8769.

IV. CONCLUSIONES

La temperatura influye de manera significativa en el proceso de rehidratación de los granos de garbanzo (*Cicer arietinum*); mientras que la dureza cálcica afecta la capacidad de saturación.

Las constantes del modelo de Peleg describen de mejor manera el efecto de la temperatura y la dureza cálcica en la rehidratación de los granos de garbanzo (1), (2):

$$k_1 = 601.53 - 0.26x_1 - 28.695x_2 + 1.6(10^{-3})x_1x_2 + 2.95(10^{-4})(x_1)^2 + 0.395(x_2)^2 \quad (1)$$

$$k_2 = 0.67 - 2.37(10^{-4})x_1 + 0.012x_2 + 4.92(10^{-6})x_1x_2 + 4.96(10^{-8})(x_1)^2 - 2.81(10^{-4})(x_2)^2 \quad (2)$$

RECONOCIMIENTO

Agradecimiento al Laboratorio de Microbiología y Biotecnología de Productos Agroindustriales, de la Universidad Nacional de Trujillo.

REFERENCIAS

[1] A. C. Miano and P. E. D. Augusto, "The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17, no. 2, pp. 352–370, 2018, doi: 10.1111/1541-4337.12328.

[2] S. Chuetor, A. Barakat, X. Rouau, and T. Ruiz, "Analysis of ground rice straw with a hydro-textural approach," *Powder Technol.*, vol. 310, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.12.072.

[3] M. A. Akpapunam and S. Sefa-Dedeh, "Some physicochemical properties and anti-nutritional factors of raw, cooked and germinated Jack bean (*Canavalia ensiformis*)," *Food Chem.*, vol. 59, no. 1, pp. 121–125, 1997, doi: 10.1016/S0308-8146(96)00248-8.

[4] Y. Wang, M. Zhang, and A. S. Mujumdar, "Effect of cassava starch gel, fish gel and mixed gels and thermal treatment on structure development and various quality parameters in microwave vacuum-dried gel slices," *Food Hydrocoll.*, vol. 33, no. 1, pp. 26–37, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.foodhyd.2013.02.005.

[5] A. A. Gowen, N. Abu-Ghannam, J. M. Frias, J. M. Barat, A. M. Andres, and J. C. Oliveira, "Comparative study of quality changes occurring on dehydration and rehydration of cooked chickpeas (*Cicer arietinum* L.) subjected to combined microwave-convective and convective hot air dehydration," *J. Food Sci.*, vol. 71, no. 6, 2006, doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00082.x.

[6] A. Cimini, A. Poliziani, and M. Moresi, "Effect of temperature on the hydration kinetics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) and yellow soybean (*Glycine max*)," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 87, no. April, pp. 31–36, 2021, doi: 10.3303/CET2187006.

[7] J. Saavedra, B. de Oliveira Gomes, P. E. D. Augusto, M. L. Rojas, and A. C. Miano, "Structure-process interaction in mass transfer processes: Application of ethanol and ultrasound in a vascular structure," *J. Food Process Eng.*, vol. 46, no. 6, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1111/jfpe.14187.

[8] P. E. D. Augusto and A. C. Miano, "Describing the Sigmoidal Behavior of Roasted White Lupin (*Lupinus albus*) During Hydration," *J. Food Process Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1111/jfpe.12428.

[9] T. Patero and P. E. D. Augusto, "Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 23, pp. 11–15, 2015, doi: 10.1016/j.ultrsonch.2014.10.021.

[10] A. C. Miano and P. E. D. Augusto, "The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, vol. 17, no. 2, pp. 352–370, Mar. 2018, doi: 10.1111/1541-4337.12328.

[11] S. O. Oladele, O. F. Osundahunsi, L. A. S. Agbetoye, and P. E. D. Augusto, "Hydration kinetics of Carioca beans at different pHs," *J. Food Process Eng.*, vol. 41, no. 8, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1111/jfpe.12908.

[12] G. Polo-Ruiz et al., "Osmotic dehydration effects on mass transfer kinetics and characteristics of fried banana (*Musa balbisiana*) chips," in 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development" "Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy," Jul. 2020, pp. 1–7, doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.102.

[13] N. Agarwal, G. Singh, and B. K. Kumbhar, "Modelling the hydration kinetics of kidney beans (*Phaseolus vulgaris*) in sodium salts using

- response surface methodology,” *J. Appl. Nat. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 42–52, 2020, doi: 10.31018/jans.v12i1.2234.
- [14] F. R. Assis, R. M. S. C. Morais, and A. M. M. B. Morais, “Mass Transfer in Osmotic Dehydration of Food Products: Comparison Between Mathematical Models,” *Food Engineering Reviews*, vol. 8, no. 2, 2016, doi: 10.1007/s12393-015-9123-1.
- [15] A. C. Miano, M. L. Rojas, and P. E. D. Augusto, “Combining ultrasound, vacuum and/or ethanol as pretreatments to the convective drying of celery slices,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 79, p. 105779, 2021, doi: 10.1016/j.ultsonch.2021.105779.
- [16] E. Paredes, M. Quiroz, K. Quispe, B. Reyes, and N. Zavaleta, “Aplicación del modelo de Peleg para estudiar el efecto de la temperatura y dureza del agua durante la rehidratación de frijol caballero (*Phaseolus vulgaris*),” *Agroindustrial Sci.*, vol. 1, 2012, doi: 10.17268/agroind.science.2012.01.02.
- [17] S. Sefa-Dedeh and D. W. Stanley, “The relationship of microstructure of cowpeas to water absorption and dehulling properties,” *Cereal chemistry*, vol. 56, no. 4, pp. 379–385, 1979, [Online]. Available: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1979/Document s/CC1979a108.html](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1979/Document%20s/CC1979a108.html).
- [18] F. K. Saalia et al., “Effects of corn steep water pretreatment on the rheological and microstructural properties of Ga-kenkey,” *J. Food Process Eng.*, vol. 40, no. 5, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1111/jfpe.12521.
- [19] A. C. Miano, A. Ibarz, and P. E. D. Augusto, “Ultrasound technology enhances the hydration of corn kernels without affecting their starch properties,” *J. Food Eng.*, vol. 197, pp. 34–43, 2017, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.10.024.
- [20] U. Vásquez, R. Siche, and A. C. Miano, “Ultrasound-assisted hydration with sodium bicarbonate solution enhances hydration-cooking of pigeon pea,” *Lwt*, vol. 144, no. February, 2021, doi: 10.1016/j.lwt.2021.111191.
- [21] J. Moreno, R. Simpson, D. Estrada, S. Lorenzen, D. Moraga, and S. Almonacid, “Effect of pulsed-vacuum and ohmic heating on the osmodehydration kinetics, physical properties and microstructure of apples (cv. Granny Smith),” *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 562–568, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.ifset.2011.06.011.
- [22] G. Canali, F. Balestra, V. Glicerina, F. Pasini, M. F. Caboni, and S. Romani, “Influence of different baking powders on physico-chemical, sensory and volatile compounds in biscuits and their impact on textural modifications during soaking,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 57, no. 10, pp. 3864–3873, 2020, doi: 10.1007/s13197-020-04418-1.
- [23] S. Vasudeva, K. H. Vishwanathan, K. N. Aswathanarayana, and Y. M. Induhdara Swamy, “Hydration behaviour of food grains and modelling their moisture pick up as per Peleg’s equation: Part I. Cereals,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 34–41, Jan. 2010, doi: 10.1007/s13197-010-0012-6.
- [24] S. Vasudeva and K. H. Vishwanathan, “Hydration behaviour of food grains and modelling their moisture pick up as per Peleg’s equation: Part II. Legumes,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 42–46, Jan. 2010, doi: 10.1007/s13197-010-0013-5.
- [25] Y. Ding et al., “Exploring the hydration promotion and cooking quality improvement of adlay seed by high hydrostatic pressure,” *Lwt*, vol. 171, no. November, p. 114158, 2022, doi: 10.1016/j.lwt.2022.114158.