

Transferencia de materia, expansión volumétrica e inactivación de factores antinutricionales durante el remojado de soja

Mass transfer, volumetric expansion, and inactivation of antinutritional factors during soybean soaking

Giner, S.A.^{1,2}, Torrez Irigoyen, R.M.^{1,2*}

¹ Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CIDCA-CONICET), Facultad de Ciencias Exactas

² Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería

* ricardo.torrezirigoyen@ing.unlp.edu.ar

Resumen

El remojado es una etapa fundamental en la preparación de la soja previo a su consumo. Los objetivos de este trabajo fueron estudiar la cinética de remojado de soja y evaluar el efecto de la temperatura sobre los inhibidores de tripsina. Las experiencias consistieron en remojar la soja en un baño termostático, a diferentes temperaturas, entre 20 y 80°C extrayendo muestras entre 0 y 300 min. Para el modelado matemático se propuso un balance de materia en estado no estacionario que consideró un coeficiente de difusión variable y la expansión volumétrica mediante una correlación entre el radio y el contenido de humedad. La inactivación de los factores antinutricionales se determinó mediante un método enzimático. Los resultados mostraron un aumento significativo en el volumen de los granos (≈ 2.5 veces) y un ajuste satisfactorio del modelo a los datos experimentales. La mayoría de los tratamientos alcanzaron el equilibrio de humedad a los 200 minutos, excepto a 20°C. En cuanto a los inhibidores, solo el tratamiento a 80°C mostró una reducción significativa. Se seleccionó el tratamiento a 40°C durante 200 min como el más apropiado. Los resultados obtenidos pueden convertirse en información valiosa para el diseño y optimización de procesos de remojado.

Palabras clave: Soja; Remojado; Modelado matemático; Inactivación; Tripsina.

Abstract

Soaking is an essential step in the preparation of soybeans prior to consumption. The objectives of this study were to investigate the kinetics of soybean soaking and to evaluate the effect of temperature on trypsin inhibitors. The experiments involved soaking soybeans in a thermostatic bath at different temperatures, ranging from 20 to 80°C, and taking samples between 0 and 300 minutes. For mathematical modeling, a non-steady-state mass balance was proposed, considering a variable diffusion coefficient and volumetric expansion through a correlation between radius and moisture content. The inactivation of antinutritional factors was determined using an enzymatic method. The results showed a significant increase in the volume of the grains (approximately 2.5 times) and a satisfactory fitting of the model to the experimental data. Most treatments reached moisture equilibrium after 200 minutes, except at 20°C. Regarding inhibitors, only the treatment at 80°C showed a significant reduction. The treatment at 40°C for 200 minutes was selected as the most appropriate. The results obtained can be valuable information for the design and optimization of soaking processes.

Keywords: Soybean; Soaking; Mathematical modelling; Inactivation; Trypsin.

1. INTRODUCCIÓN

La soja (*Glycine max*) pertenece al grupo de las leguminosas y es un alimento reconocido por su valor nutricional, principalmente por su alto contenido de proteínas (40% p/p). Además, su materia grasa (20% p/p) también posee ácidos grasos insaturados indispensables (Andrade *et al.*, 2016; Kudelka *et al.*, 2021). El remojo o hidratación

ISSN: 3008-9336, Universidad Nacional de La Plata, Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Argentina

Recibido: 22/11/2024

Aceptado: 10/2/2025

Publicado: 2/2025

DOI: <https://doi.org/10.24215/30089336e004>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

del grano de soja es una etapa esencial durante su preparación previo a su consumo. Este proceso suele ser largo, entre 8 a 12 h, y se utiliza con el propósito de ablandar los granos para facilitar su cocción e inactivar los factores antinutricionales. En el caso de la soja, se encuentran los denominados inhibidores de tripsina (IT) una clase única de proteínas que inhiben las enzimas proteasas en el tracto digestivo al formar complejos que evitan actúen sobre las proteínas ingeridas en la dieta (Costa *et al.*, 2018; Thakur *et al.*, 2019). Los factores antinutricionales en soja comprenden dos tipos, de Kunitz (KTI) y Bowman-Birk (BBTI), los cuales suelen ser resistentes a los tratamientos térmicos en condiciones de baja humedad y en el caso del segundo, aún puede tolerar varios minutos durante la cocción (Sobral y Wagner, 2009). Si bien existen numerosos trabajos que estudian la inactivación de dichos factores con aire caliente y vapor en el grano seco (Prachayawarakorn *et al.*, 2006), aire caliente en grano previamente remojado (Torrez Irigoyen, 2013), cocción en suero proteico y tofu (Sobral y Wagner, 2009) o combinación de metodologías como presión y temperatura en leche de soja (Manassero *et al.*, 2016) aún son escasos los trabajos que evalúan el efecto que puede tener la temperatura del agua durante el remojado. Por tanto, existe un aspecto que aún merece ser objeto de investigación (Vagadia *et al.*, 2017). De forma simultánea, algunas propiedades físicas como el volumen y la densidad experimentan cambios en los granos como resultado de la difusión del agua, que a su vez está influenciada por el tiempo de proceso y la temperatura. Por lo tanto, la comprensión de la cinética de remojado, así como la influencia de las condiciones del proceso sobre la velocidad de transferencia de materia y la inactivación de los factores antinutricionales resulta esencial (De Lima *et al.*, 2014; Shafaei *et al.*, 2016).

El modelado matemático del remojado ha sido estudiado en numerosos alimentos: frutas y verduras (Krokida y Marinos–Kouris, 2003), en diferentes tipos de semillas (Kaptso *et al.*, 2008) así como también en cereales como por ejemplo arroz (Hu *et al.*, 2021). Algunos autores estudiaron los procesos de transferencia de materia durante el remojo a través de modelos empíricos que, aunque con menor complejidad, proporcionaron predicciones precisas sin basarse en un mecanismo subyacente (Vega–Gálvez *et al.*, 2009; Shafaei *et al.*, 2016). Por otro lado, para geometrías simples considerando volumen y difusividad constantes, el proceso difusivo en estado no estacionario conduce a una ecuación diferencial parcial que puede resolverse analíticamente. Estas soluciones fueron empleadas con éxito por varios autores (Khazaei y Mohammadi, 2009; Costa *et al.*, 2018). Mientras que las soluciones analíticas pueden proporcionar información sobre el contenido de humedad local, que varía con el tiempo y la posición dentro del grano, se debe mantener la suposición de volumen constante y coeficiente de difusión constante. Sin embargo, un modelo de difusión preciso debe tener en cuenta el incremento de tamaño (volumen) que se produce en el grano a medida que aumenta el contenido de humedad. La consideración matemática del incremento de volumen implica, casi invariablemente, la dependencia del coeficiente de difusión respecto a la humedad, ya que la estructura del grano se modifica por el aumento de tamaño. En el caso particular de la soja, Hsu (1983) propuso un modelo resuelto mediante diferencias finitas basado en la ley de difusión de Fick con un coeficiente dependiente de la concentración, expresado en forma exponencial, para describir la absorción de agua por los granos a 30°C. Posteriormente, Deshpande *et al.* (1994) quienes estudiaron el remojo, también en soja, en un rango de temperaturas limitado de 26 a 33°C, desarrollaron una ecuación empírica sencilla para describir la transferencia de masa en función del tiempo. Sin embargo, ninguno de estos autores consideró la variación de volumen durante dicho proceso. Algunos años después, Nicolin *et al.* (2015) siguiendo un enfoque similar al utilizado por Hsu (1983), pero mediante la utilización de métodos numéricos, como las diferencias finitas en esquema explícito, desarrollaron un modelo matemático y consideraron el incremento de volumen durante el remojado, aunque descuidando la variación del coeficiente de difusión con el contenido de humedad.

Por su parte, autores como Torrez Irigoyen y Giner (2014), observaron que la solución analítica de volumen y difusividad constante de la ecuación de difusión en estado no-estacionario para esferas proporcionó predicciones precisas en un proceso de secado-tostado de soja remojada, un proceso en el cual estudios previos revelaron que existía una contracción volumétrica considerable ($\approx 30\%$). Este hallazgo, condujo a un trabajo posterior en el cual se desarrolló un modelo resuelto mediante métodos numéricos, que consideró la contracción volumétrica y un coeficiente de difusión dependiente tanto del contenido de humedad como de la temperatura (Torrez Irigoyen *et al.*, 2014). Por tanto, así como la contracción es uno de los principales cambios que experimentan los alimentos durante el secado, el aumento de volumen o expansión volumétrica debe tenerse en cuenta en el caso del remojado a fin de mejorar los modelos matemáticos y proporcionar una descripción más adecuada del fenómeno de transferencia de materia (Rahman y Kumar, 2006). Con este fin, los objetivos de este trabajo fueron desarrollar un modelo matemático para interpretar la cinética de remojado de soja, considerando la expansión volumétrica y

un coeficiente de difusión variable y evaluar el efecto de la temperatura sobre la inactivación de los factores antinutricionales durante este proceso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó con soja variedad Don Mario 5.5 donadas por la empresa Don Mario Semillas (Buenos Aires, Argentina).

2.1. Remojado

Los granos fueron limpiados cuidadosamente, se depositaron en una canasta de acero (masa inicial de granos: 250 ± 0.3 g) y luego se sumergieron en un baño de agua con agitación (Tecnodalvo SRL, Argentina), equipado con un control automático de temperatura ($T_{\max} = 90^\circ\text{C}$). Se utilizó agua destilada en una proporción de masa de agua a soja de 20:1. Se determinaron las curvas experimentales del contenido de humedad en función del tiempo a temperaturas de 20, 40, 60 y 80°C . Antes del inicio de cada experiencia, el agua destilada se mantuvo en el baño a la temperatura objetivo durante un período de 15 minutos, para asegurarse que el sistema alcanzará el equilibrio. Las muestras se extrajeron a diferentes tiempos, entre 0 y 300 minutos, se escurrieron y secaron con papel para eliminar el exceso de agua superficial. A continuación, las muestras se dejaron en reposo unos minutos previos a la determinación del contenido de humedad y el volumen.

2.2. Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó por el método Ac-2-41, 130°C durante 3 h (AOAC, 1990) en una estufa de convección forzada (Sanjor, Argentina), con una velocidad de aire de 0.25 m/s. Cada experiencia se realizó por triplicado.

2.3. Determinación del volumen y radio del grano

Con el propósito de calcular el radio del grano durante el remojado (R), el volumen del mismo fue determinado por triplicado, a cada tiempo, mediante un método picnométrico utilizado por Torrez Irigoyen y Giner (2011a).

2.4. Modelado matemático del proceso de remojado

2.4.1. Balance microscópico de materia

Torrez Irigoyen y Giner (2011b) encontraron que la variedad de soja cruda utilizada tiene un factor de esfericidad de 0.99, el cual se modifica ligeramente a 0.96 después del proceso de remojo, en este caso a temperatura ambiente. Por lo tanto, a fines prácticos, se consideró una geometría esférica para el desarrollo del modelo. De esta manera, el balance de materia microscópico puede expresarse considerando el coeficiente de difusión como una función del contenido de humedad y la temperatura en coordenadas esféricas mediante la siguiente ecuación (Pabis *et al.*, 1998):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\partial D}{\partial r} \quad (1)$$

La Ecuación (1) expresa la variación del contenido de humedad local y se cumple en cada punto del sólido. En la misma, D representa el coeficiente de difusión efectivo del agua en m^2/s , W el contenido de humedad local, kg de agua/kg de materia seca como una función del tiempo t en segundos, y la coordenada radial r , en m. La Ec. (1) es aplicable para sistemas en los cuales el volumen se mantiene constante. Sin embargo, en productos que experimentan cambios en su tamaño (*contracción o expansión*), este balance debe expresarse utilizando unidades de concentración volumétrica (C), en kg agua/ m^3 del producto (Ruiz-López *et al.*, 2012; Torrez Irigoyen *et al.*, 2014). Por lo tanto, ahora el balance de materia se puede representar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial C}{\partial r} \frac{\partial D}{\partial r} \quad (2)$$

Las condiciones iniciales y de contorno, necesarias para resolver la Ecuación (2) se presentan a continuación:

Condición inicial

$$t = 0 \quad C = C_0 \quad R_0 \leq r \leq R \quad (3)$$

donde C_0 es la concentración de agua al inicio del proceso.

Condición de contorno en el centro

Por simetría, se considera que el flujo de material en el centro de la esfera es nulo:

$$r = 0 \quad \frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad t > 0 \quad (4)$$

un caso particular del modelo se presenta en el centro de la esfera ($r=0$), donde la Ec. (2) se vuelve indeterminada. Con el objetivo de eliminar esta singularidad es necesario aplicar la regla de L'Hopital, de esta forma para $r=0$, la Ec. (2) se convierte en:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 3D \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \quad (5)$$

Condición de contorno en la superficie

Se propuso una condición de contorno prescripta, tipo Dirichlet:

$$r = R \quad C_s = C_e \quad t > 0 \quad (6)$$

Después de determinar la concentración de agua, este valor puede transformarse en contenido de humedad en base seca (kg de agua/ kg de materia seca). Para realizar dicha conversión, se utilizó una ecuación que relaciona la concentración con la densidad del grano, expresada en kg/m³ (Torrez Irigoyen *et al.*, 2014).

$$W = \frac{C}{\rho - C} \quad (7)$$

2.4.2 Modelo de expansión volumétrica

Con el propósito de considerar la variación del coeficiente de difusión con la humedad, así como también la expansión volumétrica en el modelo de transferencia de materia, se utilizaron ecuaciones desarrolladas previamente, las mismas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones del modelo matemático que consideran volumen y difusividad variable.

Nombre	Ecuación	Autores
Expansión volumétrica	$\frac{V}{V_0} = \left[1 + a_s \frac{\rho_0(W-W_0)}{\rho_w(1+W_0)} \right]$	(8) Torrez Irigoyen (2013)
Difusividad variable	$D = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{R_g T_k} \right) \left(\frac{R}{R_0} \right)^2$	(9) Torrez Irigoyen <i>et al.</i> (2014)

Donde V_0 y V representan el volumen del grano inicial y al tiempo t , respectivamente, m³; a_s , el coeficiente de expansión volumétrica, adimensional; ρ_0 la densidad inicial del grano y ρ_w la del agua, en kg/m³.

Donde D es la difusividad y D_0 el factor pre-exponencial, en m²/s; E_a , la energía de activación kJ/mol; R_g la constante universal de los gases, 8.314 kJ/mol K; T_k , la temperatura, K; R_0 y R el radio del grano inicial y al tiempo t , en m.

2.5. Solución numérica

Se utilizó el método de diferencias finitas en esquema implícito para resolver el modelo matemático descrito por las Ecuaciones (2-9). Con el objetivo de generar un mallado más denso próximo a la superficie, donde se producen los cambios más rápidos en la concentración, y mejorar de esta manera la precisión en el cálculo de los perfiles de humedad se aplicó el siguiente procedimiento: 1) se seleccionaron las posiciones de los nodos radiales con el fin de proporcionar elementos de volumen constante a cada tiempo; 2) dados I puntos espaciales, la esfera se dividió en $(I-1)$ elementos concéntricos de igual volumen $\Delta V = V/(I-1)$, siendo V el volumen total del grano en el tiempo t , y 3) dado que el radio del grano depende del contenido de humedad promedio y este a su vez depende

del tiempo, la posición de los nodos radiales es recalculada en cada paso de tiempo (Chau y Gaffney, 1990; Torrez Irigoyen *et al.*, 2014). Las ecuaciones de diferencias finitas utilizadas para aproximar cada derivada parcial se listan a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{t^{n+1} - t^n} \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = \frac{C_{i+1}^{n+1} - C_{i-1}^{n+1}}{r_{i+1} - r_{i-1}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} = \frac{\left(\frac{C_{i+1}^{n+1} - C_i^{n+1}}{r_{i+1} - r_i} \right) - \left(\frac{C_i^{n+1} - C_{i-1}^{n+1}}{r_i - r_{i-1}} \right)}{0.5(r_{i+1} - r_{i-1})} \quad (12)$$

$$\frac{\partial D}{\partial r} = \frac{D_{i+1}^{n+1} - D_{i-1}^{n+1}}{r_{i+1} - r_{i-1}} \quad (13)$$

el subíndice i se refiere a la posición espacial mientras que el superíndice n al tiempo, por su parte, $r_i = (i-1)\Delta r_i$, siendo $\Delta r_i = (r_{i+1} - r_i)$ y $t^n = (n-1)\Delta t$. Por tanto, a partir de las Ecuaciones (10-13), reordenándolas y reemplazándolas en la Ec. (3) puede encontrarse la forma discreta del sistema de ecuaciones para realizar los cálculos:

- Para el centro de la esfera, $i=1$:

$$\left[1 + \frac{6\Delta t D_1^{n+1}}{r_2^2} \right] C_1^{n+1} + \left[-\frac{6\Delta t D_1^{n+1}}{r_2^2} \right] C_2^{n+1} = C_1^n \quad (14)$$

- Ecuación general para los puntos intermedios, $i=2 \text{ a } I-1$:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\Delta t}{(r_{i+1} - r_{i-1})} \left(\frac{-D_i^{n+1}}{0.5(r_i - r_{i+1})} \right) + \frac{2D_i^{n+1}}{r_i} + \frac{(D_{i+1}^{n+1} - D_{i-1}^{n+1})}{(r_{i+1} - r_{i-1})} \right] C_{i-1}^{n+1} + \dots \\ & \left[1 + \frac{D_i^{n+1}\Delta t}{0.5(r_{i+1} - r_{i-1})} \left(\frac{1}{r_{i+1} - r_i} + \frac{1}{r_i - r_{i-1}} \right) \right] C_i^{n+1} + \dots \\ & \left[\frac{\Delta t}{(r_{i+1} - r_{i-1})} \left(\frac{-D_i^{n+1}}{0.5(r_{i+1} - r_i)} - \frac{2D_i^{n+1}}{r_i} - \frac{(D_{i+1}^{n+1} - D_{i-1}^{n+1})}{(r_{i+1} - r_{i-1})} \right) \right] C_{i+1}^{n+1} = C_i^n \end{aligned} \quad (15)$$

- En la superficie de la esfera, $i=I$:

$$C_I^{n+1} = C_e \quad (16)$$

Donde el valor de C_e se obtiene de la relación entre la densidad del grano al final del proceso de remojado (ρ_e), considerada como el valor de equilibrio (Ec. (7)). El conjunto de Ecuaciones (14-16) es un sistema no-lineal dado que los coeficientes de la matriz incluyen a la difusividad (D), la cual a su vez depende de la variable desconocida (W). Para evitar la complejidad de resolver un sistema no-lineal iterativo en cada paso de tiempo, con el fin de calcular el perfil de humedad el coeficiente de difusión se evaluó en el tiempo n de modo que el sistema de ecuaciones ahora se vuelve lineal. La concentración volumétrica media de agua C_m en el tiempo t se calculó mediante la regla del trapecio, a través de la siguiente manera:

$$C_m = \frac{3}{R^3} \int_0^R (C r^2) dr \quad (17)$$

dado que esta metodología permite la integración numérica con un tamaño variable del paso. Luego, el contenido de agua medio (W_m) se calculó utilizando la Ec. (7). Para la resolución de todos los cálculos, el modelo utilizó 31 nodos radiales y un paso de tiempo de 10 segundos programado en el entorno MATLAB (MATLAB v7.0.01992.0, The MathWorks, Inc, Natick, EE.UU.).

2.6. Análisis estadístico

La bondad del ajuste se evaluó mediante el valor del coeficiente de determinación (r^2) y otro indicador como el Error Cuadrático Medio (ECM), el cual se expresa en las mismas unidades que la variable dependiente:

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{pred,i} - y_{exp,i})^2}{N}} \quad (18)$$

Donde $y_{exp,i}$ corresponde a los valores experimentales mientras que $y_{pred,i}$ indica los valores predichos.

2.7. Determinación de la Actividad Antitríptica

La actividad de los factores antitrípticos se determinó mediante un método enzimático desarrollado por González y Carrillo (1987) para soja y productos derivados. Esta metodología se basa en la hidrólisis de hemoglobina por la tripsina, si dicha enzima está activa se observará una coloración azul originada por la reacción entre los péptidos liberados de la hemoglobina y el reactivo de Folin-Ciocalteu. De esta manera, la intensidad de la coloración dependerá del grado de actividad de los factores antinutricionales presentes.

2.7.1 Preparación de los extractos de muestra

Se pesó 1 g de muestra de soja remojada, previamente molida, se disolvió en 30 ml de HCl 0.05 N y se mantuvo en agitación durante 15 min. Se dejó reposar 24 h en refrigeración (5°C). A continuación, se centrifugó a 2800 rpm durante 10 min en una centrifuga (Rolco Modelo 2036). Se tomó una alícuota del sobrenadante y se ajustó a pH 8.0 con una solución saturada de Na₂CO₃. Finalmente se llevó a volumen final de 25 ml en un matraz con buffer fosfato de sodio pH=8.0 (0.0455 mol/L Na₂HPO₄, 0.0045 mol/L NaH₂PO₄).

2.7.2 Preparación del sustrato de Hemoglobina

Se pesaron 2 g Hemoglobina bovina (Sigma-Aldrich, St Louis, EE.UU.), se disolvieron en 16 ml de NaOH 0.5 N. Se agregó 64 ml de agua destilada y 36 g urea (agente desnaturalizante) en constante agitación. Se dejó en reposo por 1 h. Posteriormente, se agregaron 4 g de urea y se ajustó a pH=8.0 con una solución de ácido fosfórico 1.0 M. Finalmente, se agregaron 4 g más de urea y se ajustó nuevamente el valor del pH a 8.0.

2.7.3 Reacción enzimática

Un mililitro de sustrato de hemoglobina fue incubado a 37°C durante 10 min. A continuación, se agregaron 0.1 ml de solución de extracto al sustrato y la reacción dio inicio cuando se agregaron 0.1 ml de tripsina porcina, 10 mg/ml (Sigma, St. Louis, EE.UU.). El control de la actividad de la tripsina fue determinado reemplazando el extracto con solución de buffer fosfato. Por su parte, el blanco de reacción se preparó agregando 2 ml de Ácido Tricloroacético (TCA) 5% (p/v) y 0.1 ml de buffer fosfato previo a la adición de la tripsina. De esta forma, todo el conjunto de muestras se incubó a 37°C por 20 min. Al cabo de este tiempo, la reacción se detuvo adicionando 2 ml de TCA tanto en el control, así como en los tubos que contenían las muestras. Posteriormente, todos los tubos se centrifugaron a 2800 rpm durante 10 min en una centrifuga (Rolco Modelo 2036). Seguidamente, se adicionaron 2 ml de NaOH 1.0 mol/ L y 0.6 ml del reactivo de Folin-Ciocalteu diluido en agua destilada (relación 1:2). Luego de 1 h de reposo en oscuridad, se realizó la lectura de la absorbancia a 650 nm utilizando un espectrofotómetro Shimadzu Mini-1240 UV-Visible. El cálculo de la inactivación de los factores antinutricionales (IFA) se realizó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 100\% \text{ de actividad de proteasa} &= Abs_{(control)} - Abs_{(blanco)} \\ \% \text{ Actividad de tripsina} &= [Abs_{(muestra)} - Abs_{(blanco)}] / [Abs_{(control)} - Abs_{(blanco)}] \times 100 \\ \% \text{ de inhibición de tripsina} &= 100\% - \% \text{ Actividad de tripsina} \end{aligned} \quad (19)$$

Las muestras de soja cruda, sin tratar fueron tomadas como referencia (RF) para el 100 de la actividad de inhibidores de tripsina

$$\begin{aligned} \% \text{ Inhibidores de tripsina} &= \% \text{ Inhibidores de tripsina}/\text{RF} \times 100 \\ \% \text{ Inactivación inhibidores de tripsina} &= 100 - \% \text{ Inhibidores de tripsina} \end{aligned} \quad (20)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación del coeficiente de expansión

Los resultados obtenidos mediante el ajuste de la Ec. (8), volumen normalizado (V/V_0) en función del contenido de humedad medio (W_m) para cada uno de los tratamientos demostró que las predicciones a todas las temperaturas fueron similares, es decir que en todos los casos la expansión volumétrica fue semejante. Una prueba de comparación estadística a un nivel de confianza del 95% mostró que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Por lo tanto, se realizó un único ajuste con todo el conjunto de datos para determinar un único coeficiente de expansión para todas las experiencias, dichos resultados se presentan la Fig. 1.

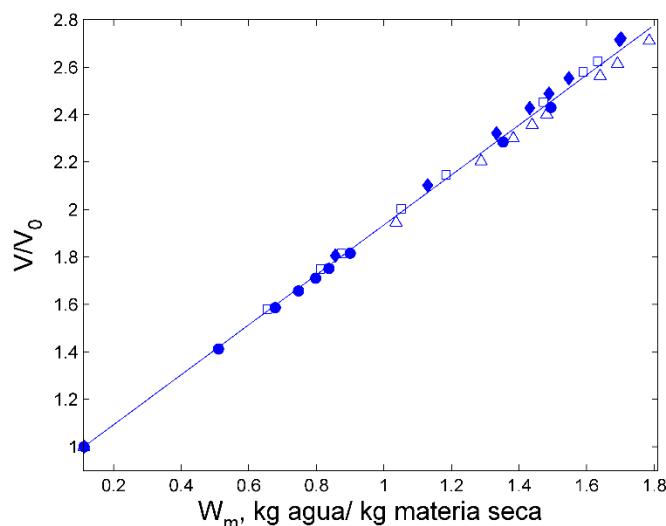


Figura 1. Volumen normalizado de soja como función del contenido medio de humedad. Valores predichos (línea sólida) mediante la Ec. (8) junto a los valores experimentales (símbolos) para cada uno de los tratamientos: (●) 20°C, (□) 40°C, (♦) 60°C, y (△) 80°C.

El valor obtenido para el coeficiente de expansión (a_s) fue igual a 0.962 ($r^2=0.997$). Como se observa en la Fig. 1, el modelo mostró predicciones precisas para todos los tratamientos. El coeficiente de expansión obtenido sugiere que el volumen de las partículas aumentó 0.962 mm³ por cada mm³ de agua absorbida. Esto indica un aumento considerable de su tamaño, si tomamos en cuenta el volumen final alcanzado en cada caso encontramos que los granos aumentaron su volumen aproximadamente 2.5 veces. La estimación de este tipo de fenómenos resulta importante para una mejor comprensión de los efectos del proceso de remojado sobre el tamaño (Bello *et al.*, 2010).

3.2. Cinética de remojado

La Fig. 2 muestra el contenido de humedad medio experimental de los granos de soja en función del tiempo, junto con las predicciones obtenidas mediante el modelo numérico. De acuerdo a lo observado, las curvas presentaron un incremento rápido durante los minutos iniciales del proceso, seguido por una etapa ligeramente

más lenta a medida que avanza el tiempo hasta alcanzar un valor asintótico en un tiempo de alrededor de 200 min dependiendo de la temperatura.

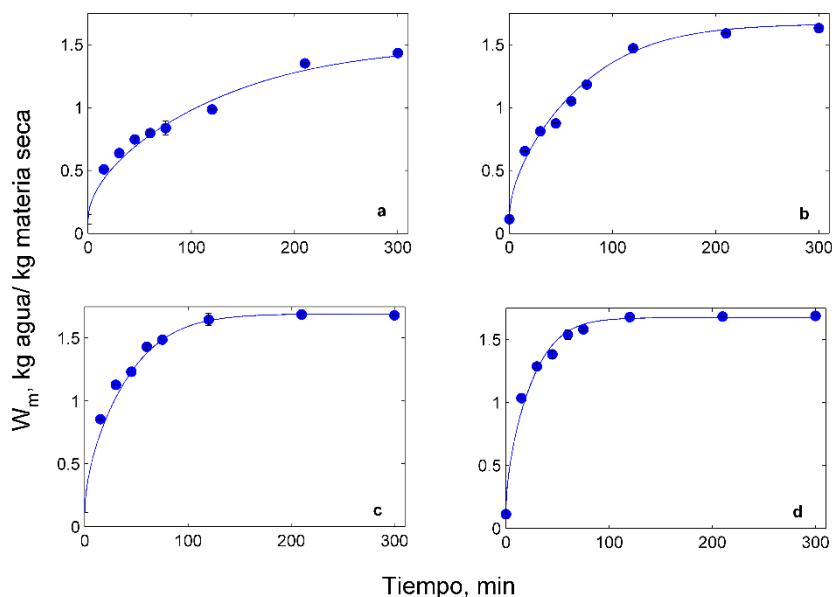


Figura 2. Contenido de humedad medio de soja en función del tiempo. Valores predichos mediante el modelo numérico (*línea sólida*) y valores experimentales (*símbolos*) para cada temperatura: (a) 20°C, (b) 40°C, (c) 60°C y (d) 80°C.

Además, es apreciable que el aumento en el contenido de humedad fue más rápido a medida que la temperatura de remojo aumentó. Este comportamiento resulta más evidente al comparar la curva de 20°C con las otras temperaturas. Autores como Bello *et al.* (2010) en arroz y De Lima *et al.* (2014) con soja observaron comportamientos similares trabajando en un rango comparable de temperaturas y tiempos de remojo. Otros autores, como Kashaninejad *et al.* (2007) sugieren que el remojado a temperatura ambiente (20-25°C) involucra tiempos considerablemente largos que pueden favorecer la contaminación microbiana, lo que puede afectar algunos atributos de calidad, como el color y el sabor, del producto. Por otro lado, a temperaturas más altas se consiguen tiempos menores, pero se pueden observar otros efectos negativos como: 1) un ablandamiento excesivo del grano, y 2) por encima de 60°C, es posible cierto grado de desnaturalización de proteínas que reduce la solubilidad de algunas fracciones de las mismas (De Lima *et al.*, 2014; Khazhei y Mohammadi, 2009). En vista de lo anterior y a fines prácticos, deben considerarse temperaturas moderadas para minimizar el daño estructural y proteico. Por lo tanto, el tratamiento a 40°C durante 200 minutos (3.3 h) parece ser el más conveniente, lo cual es sustancialmente menor a los tiempos de 8 a 12 h usualmente empleados en este caso. A futuro se realizarán ensayos para cuantificar el grado de desnaturalización de proteínas a fin de completar la información.

La solución numérica representa una herramienta útil no solo para predecir el fenómeno de transferencia de materia, sino también para simular diferentes condiciones operativas, incluso aquellas con condiciones de contorno variables en el tiempo, que pueden estar presentes para relaciones agua-grano más bajas. La resolución del modelo de remojo para todo el tiempo del proceso (5 h) tomó menos de 9 segundos de tiempo de cálculo utilizando una PC con un procesador AMD Athlon II X2 250 3.00 GHz y 3.25 Gb de RAM. En la Tabla 2 se presentan los resultados del ajuste del modelo de remojo a los datos experimentales, como puede observarse las predicciones fueron satisfactorias para cada tratamiento.

Si bien los resultados obtenidos en este trabajo son satisfactorios, actualmente se están llevando a cabo estudios sobre la pérdida de sólidos solubles durante el proceso de remojo. Estos resultados se combinarán con el modelo matemático desarrollado en el presente estudio con el propósito de mejorar el conocimiento de los fenómenos de transferencia de materia (*agua y sólidos*) que ocurren durante este tipo de procesos.

Tabla 2. ECM y r^2 obtenidos mediante el ajuste del modelo numérico.

Indicador	Temperatura del agua de remojo, °C			
	20	40	60	80
ECM	0.051	0.046	0.055	0.049
r^2	0.982	0.990	0.987	0.989

La Fig. 3 muestra la variación del contenido de humedad en función del radio durante el proceso de remojado.

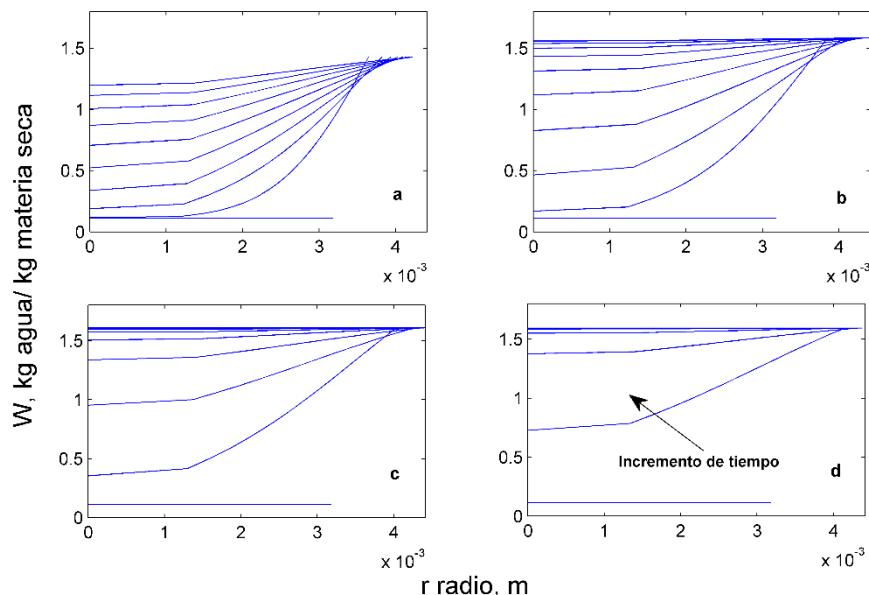


Figura 3. Perfiles simulados de humedad en función de la posición radial, cada 30 minutos hasta alcanzar el tiempo total de proceso, a cada temperatura de remojo: (a) 20°C, (b) 40°C, (c) 60 °C y (d) 80°C.

Como puede observarse en la Fig. 3 los perfiles de humedad se desplazan hacia arriba, hacia contenidos de humedad más altos. Además, dichos aumentos son más rápidos a medida que aumentó la temperatura del agua, algo similar a lo observado para la curva humedad media (Fig. 2). Por otro lado, se puede apreciar en el eje x, que a medida que aumenta el radio del grano los perfiles de humedad tienden a superponerse, aproximándose al contenido de humedad de equilibrio o saturación.

3.3. Inactivación de los factores antinutricionales

Se consideró conveniente evaluar el efecto de la temperatura sobre la inactivación de los factores antirípticos en el momento en el cual los granos alcanzaron la asymptota o, dicho de otra forma, absorbieron la mayor cantidad de agua posible. De acuerdo a lo discutido al presentar la Fig. 2, esta situación parece alcanzarse a los 200 min, a excepción de la muestra a 20°C.

En la Fig. 4 se presentan el porcentaje de inhibición de tripsina en función de la temperatura (Ec. 19) para todos los tratamientos realizados y se incluyen los valores obtenidos para la muestra cruda como control y un tratamiento más drástico realizado a 90°C, también por 200 min.

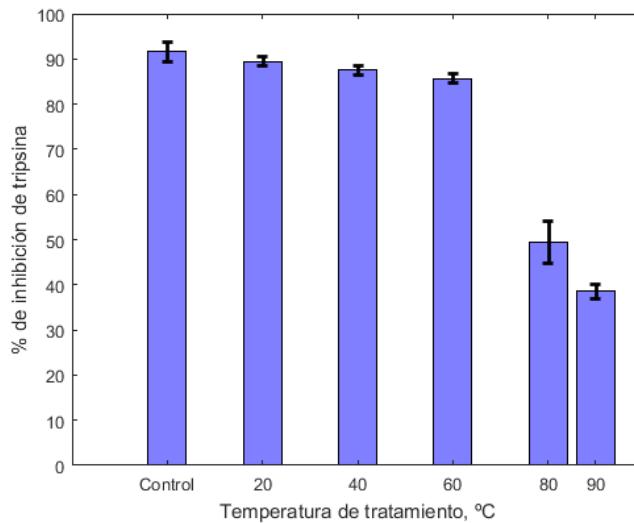


Figura 4. Porcentaje de inhibición de tripsina en función de la temperatura considerando 200 min de proceso de remojo.

Se puede apreciar en la Fig. 4, al comparar los resultados con la muestra cruda, entre 20 y 60°C, que el efecto sobre los inhibidores resultó mínimo, encontrándose aún altos porcentajes de inhibición ($\approx 88\%$) considerando 200 min de proceso. Por otro lado, a 80°C el porcentaje de inhibición se redujo a un 49% y si comparamos con el proceso a mayor temperatura de 90°C el valor alcanzado fue de 38%. Es conveniente mencionar que este último proceso se realizó solo a fines comparativos. Por tanto, es claro que el aumento progresivo de la temperatura conduce a una mayor inactivación de los factores antitrípticos. Autores como Sobral y Wagner (2009) y Manassero *et al.* (2016), quienes emplearon la misma metodología para cuantificar los inhibidores, encontraron valores similares de inactivación en tiempos menores, pero trabajando en suero y leche de soja, respectivamente. Esta diferencia probablemente se debe a que los tratamientos térmicos se aplicaron en productos cuya integridad celular era menor, por los pretratamientos, y los factores fueron más susceptibles a la temperatura. Por su parte, Torrez Irigoyen (2013) reportó valores por debajo del 20% en un tratamiento térmico en lecho fluidizado durante 60 min sobre grano de soja remojado, pero con temperaturas de aire superiores a los 100°C. Vagadía *et al.* (2017) quienes realizaron una extensa discusión sobre los diferentes tratamientos de inactivación de factores antinutricionales en soja, coinciden en que la inactivación suele ser más efectiva cuando se aplica en productos remojados o en su defecto, tratamientos con aire húmedo como vapor caliente.

Por tanto, la temperatura, el tiempo de proceso y el contenido de humedad juegan un rol fundamental en este proceso. La información encontrada en este trabajo, puede resultar clave para la reducción en el tiempo de procesos de inactivación posteriores, dado que se partiría de un producto cuyos factores se encuentran parcialmente inactivados.

4. CONCLUSIONES

El modelo de expansión volumétrica aplicado en el remojado mostró que el grano se expandió en 0.962 mm^3 por cada mm^3 de agua absorbida lo cual representó un aumento en el volumen original de 2.5 veces. Por su parte, el modelo matemático desarrollado y resuelto por el método numérico de diferencias finitas, que consideraba la variación del volumen y el coeficiente de difusión, presentó un ajuste satisfactorio en cada tratamiento realizado. A excepción del proceso a 20°C, el equilibrio de humedad o asymptota se alcanzó en tiempos de 200 min (3.3 h) lo que significa una reducción considerable del tiempo en comparación con los tratamientos de remojado convencionales. De esta manera, se analizó a este tiempo, el efecto de la temperatura del agua sobre la inactivación de los factores antinutricionales y se encontró que solo a 80°C fue posible una disminución significativa en el porcentaje de inhibición de tripsina ($\approx 49\%$). Por tanto, con el propósito de preservar las características nutricionales y estructurales del grano, las condiciones óptimas de remojado seleccionadas fueron

40°C durante 200 min. Si bien, el efecto sobre los inhibidores de tripsina en esta condición no fue considerable, tratamientos térmicos posteriores pueden contribuir a inactivarlos.

El modelo cinético desarrollado en este trabajo puede convertirse en una herramienta de utilidad para el diseño de equipos y la optimización de los procesos de remojado en granos de soja. A futuro, se planea incorporar en dicho modelo la pérdida de sólidos solubles durante el remojado con el propósito de mejorar la comprensión de todos los fenómenos de transferencia de materia que tienen lugar durante este tipo de tratamientos.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por los subsidios otorgados y al Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CIDCA) por permitirnos desarrollar nuestras tareas de investigación. El autor correspondiente desea expresar un reconocimiento especial al Dr. Sergio A. Giner por su guía, amabilidad y apoyo durante toda su carrera. El Dr. Giner falleció hace tiempo, fue fundador del Grupo de Secado de Alimentos en el CIDCA y Profesor Titular en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

Referencias

- Andrade, J. C., Mandarino, J. M. G., Kuruzawa, L. E. y Ida, E. I. (2016). The effect of thermal treatment of whole soybean flour on the conversion of isoflavones and inactivation of trypsin inhibitors. *Food Chemistry*, 194, 1095 – 1101. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.115>
- Bello, M., Tolaba, M. P., Aguerre, R. J. y Suarez, C. (2010). Modeling water uptake in a cereal grain during soaking. *Journal of Food Engineering*, 97, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.09.020>
- Chau, K.V. y Gaffney, J. J. (1990). A finite-difference model for heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration. *Journal of Food Science*, 55 (2), 484–487. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb06792.x>
- Costa, R., Fusco, F. y Gândara, J. F. M. (2018). Mass transfer dynamics in soaking of chickpea. *Journal of Food Engineering*, 227, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.004>
- De Lima, F. S., Kurozawa, E. y Ida, E. I. (2014). The effects of soybean soaking on grain properties and isoflavones loss. *LWT – Food Science and Technology*, 59, 1274–1282. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.032>
- Deshpande, S. D., Bal, S. y Ojha, T. P. (1994). A study on diffusion of water by the soybean grain during cold water soaking. *Journal of Food Engineering*, 23, 121–127. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90127-9](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90127-9)
- González, R. y Carrillo, D. (1987). *Nutrición humana. Manual de prácticas*. Editorial Pueblo y Educación.
- Hsu, K. H. (1983). A diffusion model with concentration-dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. *Journal of Food Science*, 48, 618–622. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1983.tb10803.x>
- Hu, Z., Yang, Y., Lu, L., Chen, Y., Zhu, Z. y Huang, J. (2021). Kinetics of water absorption expansion of rice during soaking at different temperatures and correlation analysis upon the influential factors. *Food Chemistry*, 346, 128912. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128912>
- Kaptso, K. G., Njintang, Y. N., Komnek, A. E., Hounhouigan, J., Scher, J., y Mbofung, C. M. F. (2008). Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds. *Journal of Food Engineering*, 86, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.014>
- Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., Rafiee, S. y Khomeiri, M. (2007). Study of hydration kinetics and density changes of rice (*Tarom Mahali*) during hydrothermal processing. *Journal of Food Engineering*, 79, 1383–1390. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.019>
- Khazaei, J. y Mohammadi, N. (2009). Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *Journal of Food Engineering*, 91, 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.010>
- Krokida, M.K. y Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57, 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00214-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00214-5)
- Kudelka, W., Kowalska, M. y Popis, M. (2021). Quality of soybean products in terms of essential amino acids composition. *Molecules*, 26, 5071. <https://doi.org/10.3390/molecules26165071>
- Manassero, C. A., Vaudagna, S. R., Sancho, A. M., Añon, M. C. y Speroni, F. (2016). Combined high hydrostatic pressure and thermal treatments fully inactivate trypsin inhibitors and lipoxygenase and improve protein solubility and physical stability of calcium-added soymilk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 32, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.04.005>

- Nicolin, D. J., Jorge, R. M. M. y Jorge, L. M. M. (2015). Moving boundary modeling of conventional and transgenic soybean hydration: moisture profile and moving front experimental validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 568-577. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.014>
- Official Methods of Analysis of AOAC international. (15° ed.). (1990). Association of Official Agricultural Chemists.
- Pabis, S., Jayas, D. S. y Cenkowski, S. (1998). *Grain Drying. Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P. y Soponronnarit, S. (2006). Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers. *LWT– Food Science and Technology*, 39, 770-778. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.05.013>
- Rahman, N. y Kumar, S. (2006). Evaluation of convective heat transfer coefficient during drying of shrinking bodies. *Energy Conversion and Management*, 47, 2591–2601. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.025>
- Ruiz-López, I. I., Ruiz Espinoza, H., Arellanes Lozada, P., Bárcenas-Pozos, M. E. y García-Alvarado, M. A. (2012). Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *Journal of Food Engineering*, 108 (3), 427–435. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.025>
- Shafaei, S. M., Masoumi, A. A. y Roshan, H. (2016). Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 15, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.08.003>
- Sobral, P. A. y Wagner, J. R. (2009). Relación entre la composición y la actividad antitríptica de sueros de soja y tofu y comportamiento térmico de sus proteínas aisladas. *Información Tecnológica*, 20(5), 65-73. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4115it.08>
- Thakur, A., Sharma, V. y Thakur, A. (2019). An overview of anti-nutritional factor in food. *International Journal of Chemical Studies*, 7(1), 2472-2479.
- Torrez Irigoyen, R. M. (2013). Diseño de un proceso térmico de fluidización para la producción de soja crocante. [Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/26978>
- Torrez Irigoyen, R. M. y Giner, S. A. (2011a). Volume and density of whole soybean products during hot-air thermal treatment in fluidised bed. *Journal of Food Engineering*, 102, 224 – 232. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.08.023>
- Torrez Irigoyen, R. M. y Giner, S. A. (2011b). Fluidisation velocities during processing of whole soybean snack. *Journal of Food Engineering*, 107, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.040>
- Torrez Irigoyen, R. M. y Giner, S. A. (2014). Drying-toasting kinetics of presoaked soybean in fluidized bed. Experimental study and mathematical modelling with analytical solutions. *Journal of Food Engineering*, 128, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.12.009>
- Torrez Irigoyen, R. M., Goñi, S. M. y Giner, S. A. (2014). Drying-toasting kinetics of presoaked soybean. A mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. *Journal of Food Engineering*, 142, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.002>
- Vagadia, B. H., Vanga, S. K. y Raghavan, V. (2017). Inactivation methods of soybean trypsin inhibitor – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 64, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.003>
- Vega-Gálvez, A., Notte-Cuello, E., Lemus-Mondaca, R., Zura, L. y Miranda, M. (2009). Mathematical modelling of mass transfer during rehydration process of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller). *Food and Bioproducts Processing*, 87, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2008.10.004>