



## Artículo

# Cinética de adsorción de agua en purés deshidratados de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)

Water adsorption kinetics in dehydrated mashed cassava (*Manihot esculenta* Crantz)

María M. **Brousse**<sup>1\*</sup>, Andrea B. **Nieto**<sup>2</sup>, Andrés R. **Linares**<sup>1</sup>, María L. **Vergara**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales.  
Félix de Azara 1552, Posadas, Misiones, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.  
Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, C1428EGA, Buenos Aires, Argentina.

\*Autora para correspondencia: brousse.mariamarcela@gmail.com

Aceptado 14-Mayo-2012

## Resumen

El puré deshidratado de mandioca es un producto obtenido a partir de la raíz de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), mediante un proceso tecnológico sobre raíces limpias y peladas. Será utilizado como tal o como materia prima para la producción de pastas alimenticias o mezclas para pastas. El conocimiento de las propiedades, fisicoquímicas y funcionales del puré deshidratado de mandioca y del producto reconstituido constituye información fundamental para poder analizar las actuales y futuras aplicaciones tecnológicas. En este trabajo se estudió la influencia de la temperatura sobre el proceso de rehidratación y el efecto del tamaño de partícula sobre la cinética adsorción de agua de purés deshidratados de dos variedades de mandioca, 'Pomberí' y 'Concepción'. El efecto de la temperatura fue evaluado mediante los Índices de Adsorción de Agua a tres temperaturas (30, 40 y 50 °C). La cinética de adsorción de agua fue estudiada con los modelos de Pilosof y Exponencial. El Índice de Adsorción de Agua aumentó con el incremento de la temperatura en los purés de las dos variedades de mandioca. Los modelos de Pilosof y Exponencial describieron adecuadamente la cinética de adsorción de agua. La velocidad de adsorción de agua fue mayor en el puré con las partículas de menor tamaño.

**Palabras claves:** adsorción de agua, cinética, puré de mandioca, rehidratación, temperatura.

### Abstract

Dehydrated mashed cassava is a product made from the cassava root (*Manihot esculenta* Crantz) through a technological process on cleaned and peeled roots. Be used as such or as feedstock for the production of pasta or pasta mixtures. Knowledge of the physicochemical and functional properties of dehydrated mashed cassava and of the reconstituted product is essential information to analyze current and future technological applications. In this work were studied the influence of temperature on the rehydration process and the effect of particle size on water adsorption kinetics of dehydrated purees of two varieties of cassava, 'Pomberi' and 'Concepción'. The effect of temperature was evaluated using the Water Adsorption Index at three temperatures (30, 40 y 50 °C). The kinetics of water adsorption was studied with Pilosof and Exponential Models. The Water Adsorption Index increases with increasing temperature for two cassavas varieties. The kinetics of water adsorption was fitted to the models used. The rate of water adsorption was greater in puree with smaller particles.

**Keywords:** cassava puree, kinetics, rehydration, temperature, water adsorption.

### INTRODUCCIÓN

La mandioca, yuca o 'cassava' (*Manihot esculenta* Crantz), planta originaria de América tropical, es un arbusto leñoso perenne, que pertenece a la familia Euphorbiaceae. Esta especie es de gran importancia socioeconómica para los agricultores y consumidores de pocos recursos económicos de países tropicales, ya que es un producto básico en su dieta alimenticia; constituyéndose además, en una de las especies más eficientes en cuanto a la producción de almidón (Mejía de Tafur, 2002).

El puré de batata (*Ipomoea batatas*) puede ser procesado mediante diversos métodos de secado y luego pulverizado a harina (Grabowskia *et al.*, 2008; Truong y Avula, 2010). Mejor conocidos son los purés deshidratados de papa (*Solanum tuberosum*) (Willard *et al.*, 1956). El puré de mandioca deshidratado es un desarrollo de tecnología propia de la Cooperativa Agrícola e Industrial San Alberto, Limitada (Misiones, Argentina).

En la Provincia de Misiones en Argentina, el tiempo de conservación de las raíces de mandioca luego de la cosecha es muy corto. Esto se debe a que la raíz una vez cosechada sufre rápidos deterioros de origen

fisiológico, endógeno y microbiológico, por lo que el mercado se ve reducido a zonas cercanas a la de producción, lo cual constituye un problema para una mayor comercialización (Brumovsky y Fretes, 2008). Para la preservación de las raíces, se ha ensayado la utilización de "tecnología de obstáculos" (Brumovsky *et al.*, 2008; Brumovsky y Fretes, 2008), no obstante, el desarrollo de productos congelados, deshidratados y conservas derivados de la mandioca es un reto comercial (Brousse *et al.* 2010).

La deshidratación o secado es una de las operaciones unitarias más usadas para la conservación de alimentos (Nijhuis *et al.*, 1996; Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005; Marín-B. *et al.*, 2006). Son ampliamente conocidas las ventajas de los alimentos deshidratados, ya que al reducir el contenido de humedad de ellos, se previene el crecimiento de microorganismos y se minimizan las reacciones de deterioro (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005). Además, el secado de los alimentos reduce su volumen y peso, lo que influye en una reducción importante de los costos de empaque, almacenamiento y transporte (Nijhuis *et al.*, 1996; Ibarz y Barbosa-Cánovas; 2005).

La mayoría de los productos deshidratados son generalmente rehidratados para su uso; pretendiendo obtener productos que al reconstituirse adquieran rápidamente sus características originales. Este proceso se ve influido por la composición y preparación de la muestra, las condiciones del secado y el grado de ruptura estructural y química (McMinn y Magee, 1997).

La rehidratación es un proceso complejo que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, anteriormente deshidratado. En algunos casos, la velocidad de rehidratación sirve como medida de la calidad del producto, siendo los alimentos deshidratados en condiciones óptimas los que se deterioran menos (Weerts *et al.*, 2005). Varios investigadores observaron que durante el secado se presenta una ruptura celular irreversible, resultando la pérdida de la integridad reflejada en la disminución de la capacidad de retención de agua del producto rehidratado (Lewicki *et al.*, 1997; Krokida y Marinos-Kouris, 2003, Ramos *et al.*, 2003). En cuanto a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, se puede mencionar que el agua es adsorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente tendiendo asintóticamente a un valor de equilibrio, es decir, que todos los espacios intercelulares o intracelulares quedan saturados con agua (Marín-B *et al.*, 2006).

La adsorción de agua, en la rehidratación, ocurre mediante tres procesos simultáneos: la imbibición del agua en el material deshidratado, la hinchazón y la lixiviación de solubles (McMinn y Magee, 1997; Lewicki, 1998). Fennema (1980) describe que al incrementar la temperatura las moléculas de almidón vibran vigorosamente rompiéndose los enlaces intermoleculares, separándose fragmentos de la cadena de almidón, facilitando la formación de uniones puente de hidrógeno con el agua. El calentamiento del almidón destruiría el complejo lípido-amilosa, que interfiere con la

adsorción del agua. Por otro parte, los enlaces puente de hidrógeno que se forman entre la amilosa y el agua, son también responsables de la adsorción de agua y de la gelatinización del almidón.

El proceso de adsorción es expresado mediante índices y modelos cinéticos. El índice de adsorción de agua y el poder de hinchamiento son usados como indicadores de la retención del agua, mientras que el índice de solubilidad indica el nivel de degradación de los polímeros contenidos en éste (Ruales *et al.*, 1983). El índice de adsorción de agua es una medida indirecta del grado de almidón gelatinizado por la cocción (Bressani y Estrada-Ligorria, 1994). Todas estas variables están relacionadas con la palatabilidad de los alimentos.

Los modelos utilizados para describir la cinética de adsorción de agua pueden ser clasificados en dos categorías: teóricos y empíricos (García-Pascual *et al.*, 2006). En los estudios de transferencia de masa sobre la rehidratación de alimentos se aplican en general la primera y segunda ley de Fick (Saguy *et al.*, 2005). Estos modelos teóricos son complejos e implican numerosas funciones y parámetros, y, por lo tanto, no son convenientes para los cálculos prácticos en la mayoría de las situaciones (Maskan, 2002). En un intento de simplificar el modelado del proceso de adsorción de agua se han propuesto los modelos empíricos: Pilosof *et al.* (1985), Singh y Kulshrestha (1987), Peleg (1988) y Exponencial, como herramientas de análisis precisas para la predicción y la optimización de la cinética de rehidratación. Sopade *et al.* (2007) demostraron que los modelos de Pilosof *et al.* (1985), Singh y Kulshrestha (1987) y Peleg (1988), son matemáticamente equivalentes y pueden usarse cualquiera de ellos para modelar el comportamiento de adsorción de los alimentos.

Los objetivos de este trabajo fueron: determinar el Índice de Adsorción de Agua (ÍAA) de los productos deshidratados y evaluar

la capacidad predictiva de los modelos de Pilosof *et al.* (1985) y Exponencial, para describir la cinética de adsorción de agua del puré deshidratado de mandioca de las variedades ‘Pomberi’ y ‘Concepción’.

Los modelos empíricos, verificados por los datos experimentales, permitirán a los ingenieros proporcionar soluciones óptimas a los aspectos del proceso de rehidratación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materia base (descripción)

El puré deshidratado de mandioca consiste en un producto obtenido a partir de la raíz de mandioca (*Manihot esculenta*), mediante un proceso tecnológico (Brousse *et al.*, 2009). Los purés de mandioca deshidratados (variedades ‘Pomberi’ y ‘Concepción’) fueron realizados en planta piloto por la Cooperativa Agrícola e Industrial San Alberto, Ltda., ubicada en Puerto Rico, Misiones, Argentina. Ambas muestras presentaron la forma de los agujeros por donde fueron extruidos y una coloración amarilla. El análisis de componentes de las muestras fue realizado en laboratorio externo (Laboratorio de la Dirección General de Industria, dependiente Subsecretaría de Industria, Economía, Geología y Minería, Provincia de Misiones, Argentina). El contenido de humedad inicial de las muestras se realizó con una balanza analítica marca Denver (Denver Instrument GmbH, Alemania) de precisión 0,0001 g y una estufa de vacío marca FAC, modelo Vacifac 2030 (Fábrica de Aparatos Científicos, S. A., Argentina - Instrumental Pasteur, S. R. L., Argentina). Los ensayos para las determinaciones del índice y la cinética de adsorción de agua se llevaron a cabo en el Laboratorio de Alimentos de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la Universidad Nacional de Misiones (Argentina).

### Determinación del Índice de Adsorción de Agua (ÍAA)

Las determinaciones del ÍAA se realizaron a las temperaturas de 30, 40 y 50 °C. Se colocó 2 g de muestra sin tamizar en un tubo de centrífuga y se adicionó 20 mL de agua. La mezcla se agitó vigorosamente y se colocó durante 30 minutos en un baño termostatzado, luego se repitió la agitación periódicamente. Posteriormente se centrifugó en un equipo marca Rolco, modelo CM-3070 (Rolco, S. R. L., Argentina), durante 15 minutos a 3000 rpm. Se decantó el agua y se pesó el tubo con el gel en su interior. Los ensayos se realizaron por triplicado para cada variedad de puré y temperatura.

El ÍAA se calculó mediante la siguiente expresión y se expresó como g de gel/g de puré seco.

$$\text{ÍAA} = [(\text{peso del tubo} + \text{peso del gel}) - \text{peso del tubo}] / \text{peso del puré seco}$$

### Determinación de la cinética de adsorción de agua

Para cada variedad de puré, se molió la muestra con un mortero y se clasificó con tamices marca Zonytest (Rey & Ronzoni, S. R. L., Buenos Aires, Argentina) de 50, 100 y 150 mesh, que corresponden a tamaños de partículas de 0,297; 0,149 y 0,105 mm, respectivamente.

La cinética de adsorción de agua se determinó a temperatura ambiental con una versión del equipo propuesto por Torgersen y Toledo (1977), que es una modificación del aparato diseñado por Baumann (1966). Consiste de un embudo Büchner de 4 cm de diámetro en el cual se coloca un papel de filtro (Whatman). El embudo está conectado mediante una manguera flexible a una pipeta graduada de 2 mL sostenida en posición horizontal y al mismo nivel que el papel de filtro. Se midió la hidratación de una cantidad exactamente pesada

(0,1 g) de muestra de puré deshidratado y se registró el volumen de agua que tomó la muestra a diferentes intervalos de tiempo, durante 2 horas. El ensayo se llevó a cabo por triplicado, para cada variedad de puré y los tres tamaños de partícula. La adsorción de agua se expresó como g de agua/g de puré seco.

Los resultados se analizaron estadísticamente a través de un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias (mínima diferencia significativa de Fisher, nivel de significancia 5 %), empleando el programa estadístico Statgraphics Plus for DOS, versión 7.0 (Manugistics, Inc., Rockville, MD, USA).

### Modelos matemáticos de la cinética de rehidratación

#### Modelo Exponencial

$$\text{Ecuación (1)} \quad C_{(t)} = C_{\infty} (1 - \exp^{-K \cdot t})$$

Donde:

$C_{(t)}$  : contenido de agua en el equilibrio a tiempo  $t$ , g de agua/g de puré seco

$C_{\infty}$  : contenido de agua en el equilibrio a tiempo infinito, g de agua/g de puré seco

$K$  : constante de velocidad de adsorción de agua,  $\text{min}^{-1}$

$t$  : tiempo de adsorción de agua, min

Los parámetros cinéticos  $C_{\infty}$  y  $K$  se obtuvieron a partir de los datos experimentales mediante regresión no lineal.

#### Modelo cinético de Pilosof *et al.* (1985)

$$\text{Ecuación (2)} \quad q = \frac{Q \cdot t}{B + t}$$

Donde:

$q$  : cantidad de agua adsorbida en el tiempo  $t$ , g agua/g de puré seco

$Q$  : capacidad de adsorción de agua, g de agua/g de puré seco

$B$  : tiempo en que es adsorbida la mitad de la capacidad total de adsorción ( $Q/2$ ), min

Diferenciando a la Ec. 2 se obtiene la velocidad de adsorción de agua:

$$\text{Ecuación (3)} \quad \frac{dq}{dt} = \frac{1}{B \cdot Q} (Q - q)^2$$

La Ec. 3 expresa una cinética de segundo orden donde la constante de velocidad ( $K$ ), viene expresada por:

$$\text{Ecuación (4)} \quad K = (B \cdot Q)^{-1}$$

La velocidad de adsorción de agua inicial ( $R_0$ ) (g agua/g de puré-min) se obtiene a partir de la Ec. 3, a  $t = 0$

$$\text{Ecuación (5)} \quad R_0 = \frac{Q}{B}$$

Los valores  $Q$  y  $B$  se obtuvieron a partir de la Ec. 2 y los datos experimentales se analizaron mediante regresión no lineal.

La bondad de ajuste de los modelos se evaluó con los parámetros  $R^2$  (coeficiente de determinación), RMSE (raíz cuadrada del error medio cuadrático), MBE (error de desvío medio) y E % (error porcentual promedio) dado por las ecuaciones:

Ecuación (6):

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (c_{\text{cal}} - c_{\text{exp}})^2}{n} \right]^{0,5}$$

Donde:

$c_{\text{cal}}$  : valor calculado

$c_{\text{exp}}$  : valor experimental

$n$ : número de determinaciones

$$\text{Ecuación (7)} \quad \text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (c_{\text{cal}} - c_{\text{exp}})_n}{n}$$

$$\text{Ecuación (8)} \quad \text{E \%} = \frac{\sum_{i=1}^n |(c_{\text{cal}} - c_{\text{exp}})_n|}{c_{\text{exp}n}} \cdot 100$$

Un buen ajuste es indicado por valores pequeños de RMSE y MBE,  $R^2 > 0,85$  y  $\text{E \%} < 10 \%$  (Park *et al.*, 2002; Vega-Gálvez *et al.*, 2006).

Todos los parámetros de las ecuaciones se evaluaron a través de ANOVA para determinar posibles diferencias significativas entre ellas en el intervalo de tamaño de partículas y temperaturas estudiadas. El software estadístico utilizado fue Statgraphics Plus para DOS, versión 7.0 (Manugistics, Inc., USA).

Las gráficas en las Figs. 1, 3, 4 y 5 se elaboraron con el software GraphPad Prism®, versión 5.04 para Windows (Graph Pad Software, Inc., La Jolla, CA, USA) y para las microfotografías se utilizó un microscopio marca OLYMPUS®, modelo CH2 (Olympus Corporation, Japón).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Composición porcentual de las variedades de purés deshidratados

Los resultados de los análisis de composición en base húmeda para el puré deshidratado de mandioca de la variedad ‘Concepción’ indicaron en valores porcentuales un contenido de humedad 9,3; proteína 2,3; cenizas totales 1,9; glúcidos (como almidón) 83,0; lípidos 0,4 y fibra cruda 2,1. Para la variedad ‘Pomberi’ un contenido de humedad 13,5; proteína 0,7; cenizas totales 0,6; glúcidos (como almidón) 81,7; lípidos 0,6 y fibra cruda: 2,9.

### Índice de Adsorción de Agua (ÍAA)

El ANOVA mostró que la temperatura y

variedad de mandioca influyó significativamente ( $p < 0,05$ ) sobre el proceso de rehidratación del puré deshidratado. Los ÍAA aumentaron con el incremento de la temperatura para las dos variedades de purés de mandioca.

Los valores promedios de ÍAA en función de la temperatura, se muestran en el Cuadro 1. Los valores de ÍAA para la variedad ‘Pomberi’ fueron mayores a los obtenidos para la variedad ‘Concepción’ bajo las mismas condiciones de trabajo.

Rodríguez-Sandoval *et al.* (2006) indicaron, a temperatura de 5 °C, un valor de  $4,66 \pm 0,1$  g de gel/g de muestra en harina de mandioca precocida, semejante a los valores obtenidos en este trabajo con los purés deshidratados de mandioca. Para almidón de banano verde seco, Izidoro *et al.* (2011), encontraron que la capacidad de adsorción de agua es directamente proporcional al aumento de la temperatura, obteniendo valores de  $4,14 \pm 0,36$  g gel/g de muestra a 50 °C (323 K) y  $4,24 \pm 0,24$  g gel/g de muestra a 60 °C (333 K).

### Cinética de adsorción de agua

El ANOVA sobre los valores de adsorción de agua que se obtuvieron experimentalmente mostró diferencias significativas para los tamaños de partículas de las variedades estudiadas ( $p < 0,05$ ).

Los resultados experimentales de la adsorción de agua de las dos variedades de mandioca en función del tiempo se ajustaron a los modelos Exponencial (Ec. 1) y de Pilosof (Ec. 2).

### Modelo Exponencial

En los Cuadros 2 y 3 se presentan los valores de los parámetros cinéticos obtenidos por regresión no lineal y los parámetros de la bondad del ajuste de los datos experimentales del modelo Exponencial, en relación a los tamaños de partículas de los purés deshidratados de mandioca de las variedades ‘Pomberi’ y ‘Concepción’, respectivamente.

**Cuadro 1.-** Índices de Adsorción de Agua (ÍAA) para las dos variedades de puré de mandioca a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	ÍAA (g de gel/g de puré seco)*	
	‘Pomberi’	‘Concepción’
30	4,78 ± 0,06 <sup>a</sup>	4,36 ± 0,11 <sup>a</sup>
40	5,02 ± 0,03 <sup>b</sup>	4,55 ± 0,05 <sup>b</sup>
50	5,36 ± 0,06 <sup>c</sup>	4,93 ± 0,09 <sup>c</sup>

Los valores son promedio de tres repeticiones ± error estándar.

\* Distintos superíndices en la misma columna indica que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

**Cuadro 2.-** Parámetros cinéticos y de la bondad de ajuste del modelo Exponencial en relación al tamaño de partículas, para la variedad ‘Pomberi’.\*

Tamaño de partícula (mm)	$C_{\infty}$	K	$R^2$	Bondad de ajuste		
				RMSE	MBE	E %
0,297	7,15 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,63 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,98	0,31	-0,05	7,84
0,149	6,72 ± 0,09 <sup>b</sup>	0,83 ± 0,05 <sup>b</sup>	0,97	0,36	-0,06	10,49
0,105	6,59 ± 0,09 <sup>c</sup>	1,16 ± 0,09 <sup>c</sup>	0,96	0,44	-0,07	12,73

Los valores de  $C_{\infty}$  y K son promedios de tres repeticiones ± error estándar.

$C_{\infty}$ : contenido de agua en el equilibrio a tiempo infinito. K: constante de velocidad de adsorción de agua.  $R^2$ : coeficiente de determinación. RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. MBE: error de desvío medio. E %: error porcentual promedio.

\* Distintos superíndices en la misma columna indica que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

**Cuadro 3.-** Parámetros cinéticos y de la bondad de ajuste del modelo Exponencial en relación al tamaño de partículas, para la variedad ‘Concepción’.\*

Tamaño de partícula (mm)	$C_{\infty}$ (g agua/g de puré seco)	K (min <sup>-1</sup> )	$R^2$	Bondad de ajuste		
				RMSE	MBE	E %
0,297	6,79 ± 0,06 <sup>a</sup>	1,75 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,99	0,19	-0,01	5,50
0,149	6,27 ± 0,09 <sup>b</sup>	2,62 ± 0,09 <sup>b</sup>	0,97	0,31	-0,05	6,95
0,105	5,85 ± 0,13 <sup>c</sup>	3,52 ± 0,21 <sup>c</sup>	0,93	0,49	-0,07	12,34

Los valores de  $C_{\infty}$  y K son promedios de tres repeticiones ± error estándar.

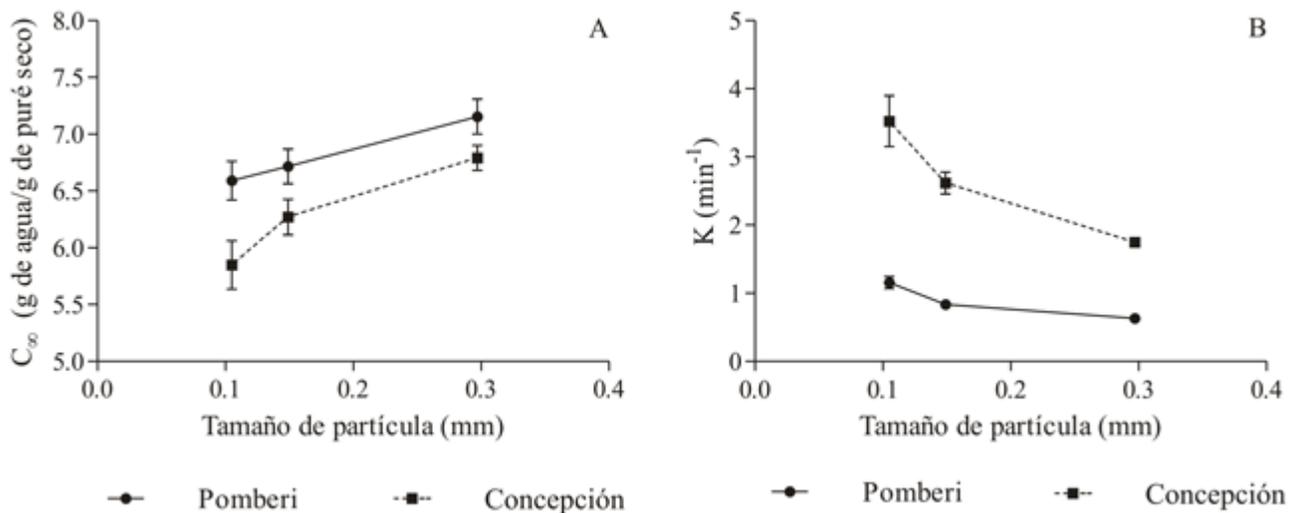
$C_{\infty}$ : contenido de agua en el equilibrio a tiempo infinito. K: constante de velocidad de adsorción de agua.  $R^2$ : coeficiente de determinación. RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. MBE: error de desvío medio. E %: error porcentual promedio.

\* Distintos superíndices en la misma columna indica que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

El ANOVA sobre los valores de  $C_{\infty}$  mostró que existieron diferencias significativas en relación a los tamaños de partículas para cada variedad estudiada ( $p < 0,05$ ). Los valores de  $C_{\infty}$ , aumentaron cuando aumentó el tamaño de las partículas. Entre variedades (Fig. 1A), en el equilibrio se mostró de manera significativa ( $p < 0,05$ ), que las muestras de la variedad ‘Pomberi’ alcanzan tener más cantidad de agua que la variedad ‘Concepción’, para los tres tamaños de partículas estudiados. Estos valores se correspondieron con los ÍAA para cada variedad.

Para K, el ANOVA mostró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en relación a los tama-

ños de partículas para cada variedad estudiada. A medida que las partículas disminuyeron en tamaño, los valores de K aumentaron. Se mostró que las partículas de menor tamaño presentaron una constante de velocidad de adsorción de agua mayor. Entre variedades (Fig. 1B), de manera significativa ( $p < 0,05$ ), la velocidad de adsorción de agua fue mayor en la variedad ‘Concepción’ para los tres tamaños de partículas. En resumen, la variedad ‘Pomberi’ alcanzó mayores valores de cantidad de agua adsorbida en el equilibrio ( $C_{\infty}$ ), pero la variedad ‘Concepción’ lo hizo a mayor velocidad inicial (K).



Los puntos de coordenadas representan el valor promedio de tres repeticiones y las barras el error estándar.

**Figura 1.-** Parámetros  $C_{\infty}$  (A) y K (B) del modelo Exponencial. Diferencias entre variedades.

Causas posibles pueden explicar las diferencias entre variedades. Los almidones de diferentes fuentes botánicas varían en tamaño del gránulo, composición y estructura de la amilopectina, entre otros factores, los cuales influyen en sus propiedades (Santelia y Zeeman, 2011). Propiedades funcionales como la adsorción de agua varían dependiendo del género (Hernández-Medina *et al.*, 2008), como

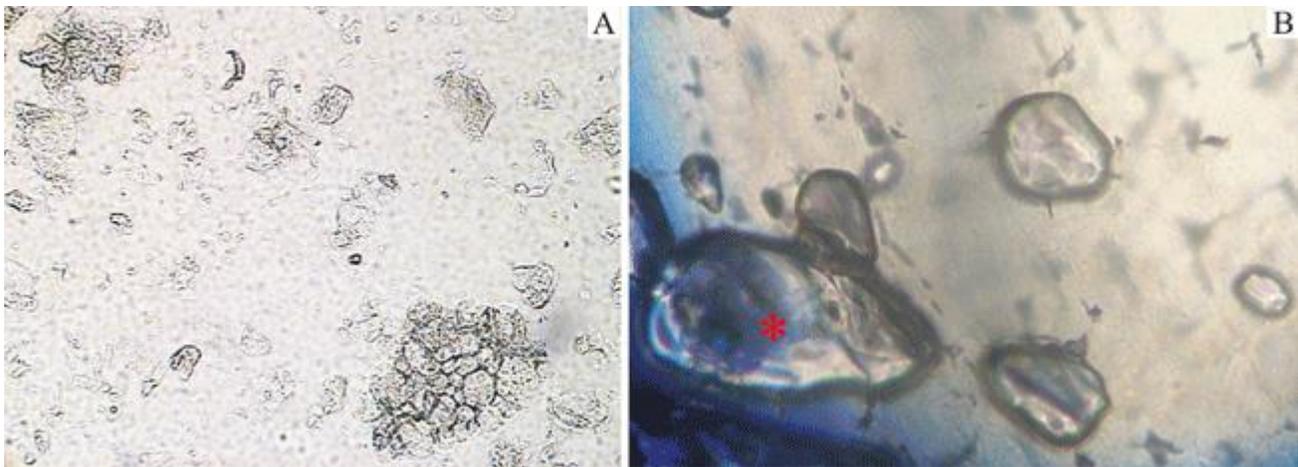
también variedades de una misma especie pueden diferir significativamente en el tamaño del gránulo (Kaur *et al.*, 2010; Ashogbon y Akintayo, 2012).

Por otra parte, cuanto más dañada se encuentra la estructura celular de una muestra, aumenta la posibilidad de ausencia de vías para la entrada de agua, con espacios intercelulares menos definidos que restringen la difusión del

agua. Esto fue observado al microscopio, donde la muestra de la variedad ‘Concepción’ presentó mayor daño celular. Se pueden observar en la Fig. 2A, restos de tejido celular roto sin gránulos de almidón bien definidos, mientras que en la Fig. 2B, referida a ‘Pomberi’, si pueden apreciarse. Es necesario aclarar en relación a los daños en gránulos de almidón, que en procesos de modificación de almidones nativos, por ejemplo, hidrólisis enzimática, los gránulos de almidón dependientemente del tamaño sufren «corrosión» superficial (en los de mayor tamaño) o erosión de la superficie con parcial o total solubilización (en los de menor tamaño) (Rocha *et al.*, 2010). Asimismo, en la fermentación ácido láctica para la obtención de almidón agrio de yuca (Vargas-Aguilar, 2010; Putri *et al.*, 2011), ha sido señalado que la

despolimerización parcial de las regiones amorfas por la acción enzimática y del ácido láctico, reduce el tamaño de las moléculas de almidón, acciones a las que se les ha atribuido la capacidad de expansión (Putri *et al.*, 2011). En los casos citados, dependiendo del daño en los gránulos con la consecuente modificación de las propiedades funcionales, puede resultar favorable y define su uso industrial.

Cabe agregar que en operaciones de molienda la mayor accesibilidad de almidón puede ser explicada por el daño a los tejidos y paredes celulares, (e incluso diferencias en el daño, han sido observadas con un mismo material en distintos molinos) (Brou *et al.*, 2008), por lo que también es probable que la variedad ‘Concepción’ haya sufrido mayor daño, por menor resistencia de su estructura a la acción mecánica.



\*: gránulo de almidón.

**Figura 2.-** Microfotografía del puré de mandioca variedad ‘Concepción’ (A) y variedad ‘Pomberi’ (B).

#### **Aplicación del modelo cinético de Pilosof *et al.* (1985)**

En los Cuadros 4 y 5 se resumen los valores de los parámetros cinéticos y los parámetros de bondad de ajuste de los datos cinéticos de adsorción de agua que se ajustaron al modelo de Pilosof, en relación a los tamaños

de partículas de los purés de mandioca de las variedades ‘Pomberi’ y ‘Concepción’, respectivamente.

El ajuste de los datos experimentales al modelo de Pilosof *et al.* (1985) de la adsorción de agua en los purés de mandioca deshidratados fue bueno, como lo muestran los valores de  $R^2$ , RMSE y E %.

**Cuadro 4.-** Parámetros cinéticos y de la bondad de ajuste del modelo de Pilosof en relación al tamaño de partículas, para la variedad ‘Pomberi’.\*

Tamaño de partícula (mm)	Q (g agua/g de puré seco)	B (min)	K (g de puré seco/g de agua·min)	R <sub>0</sub> (g de agua/g de puré·min)	R <sup>2</sup>	Bondad de ajuste		
						RMSE	MBE	E %
0,297	8,63 ± 0,11 <sup>a</sup>	1,49 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,078 ± 0,004 <sup>a</sup>	5,80 ± 0,13 <sup>a</sup>	0,99	0,23	-0,003	5,53
0,149	7,64 ± 0,09 <sup>b</sup>	1,03 ± 0,04 <sup>b</sup>	0,127 ± 0,006 <sup>b</sup>	7,44 ± 0,18 <sup>b</sup>	0,98	0,24	-0,02	7,03
0,105	7,27 ± 0,09 <sup>c</sup>	0,69 ± 0,03 <sup>c</sup>	0,199 ± 0,011 <sup>c</sup>	10,51 ± 0,34 <sup>c</sup>	0,98	0,32	-0,03	8,78

Los valores de Q, B, K y R<sub>0</sub> son promedios de tres repeticiones ± error estándar.

Q: capacidad de adsorción de agua. B: tiempo en que es adsorbida la mitad de la capacidad total de adsorción (Q/2). K: constante de velocidad. R<sub>0</sub>: velocidad de adsorción de agua inicial. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación. RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. MBE: error de desvío medio. E %: error porcentual promedio.

\* Distintos superíndices en la misma columna indica que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

**Cuadro 5.-** Parámetros cinéticos y de la bondad de ajuste del modelo de Pilosof en relación al tamaño de partículas, para la variedad ‘Concepción’.\*

Tamaño de partícula (mm)	Q (g agua/g de puré seco)	B (min)	K (g de puré seco/g de agua·min)	R <sub>0</sub> (g de agua/g de puré·min)	R <sup>2</sup>	Bondad de ajuste		
						RMSE	MBE	E %
0,297	7,74 ± 0,09 <sup>a</sup>	0,49 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,262 ± 0,02 <sup>a</sup>	15,68 ± 0,31 <sup>a</sup>	0,98	0,23	0,03	7,23
0,149	6,91 ± 0,07 <sup>b</sup>	0,30 ± 0,01 <sup>b</sup>	0,486 ± 0,02 <sup>b</sup>	23,17 ± 0,48 <sup>b</sup>	0,99	0,20	0,01	5,40
0,105	6,67 ± 0,09 <sup>c</sup>	0,24 ± 0,01 <sup>c</sup>	0,623 ± 0,03 <sup>c</sup>	27,70 ± 0,84 <sup>c</sup>	0,98	0,26	-0,02	7,25

Los valores de Q, B, K y R<sub>0</sub> son promedios de tres repeticiones ± error estándar.

Q: capacidad de adsorción de agua. B: tiempo en que es adsorbida la mitad de la capacidad total de adsorción (Q/2). K: constante de velocidad. R<sub>0</sub>: velocidad de adsorción de agua inicial. R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación. RMSE: raíz cuadrada del error medio cuadrático. MBE: error de desvío medio. E %: error porcentual promedio.

\* Distintos superíndices en la misma columna indica que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

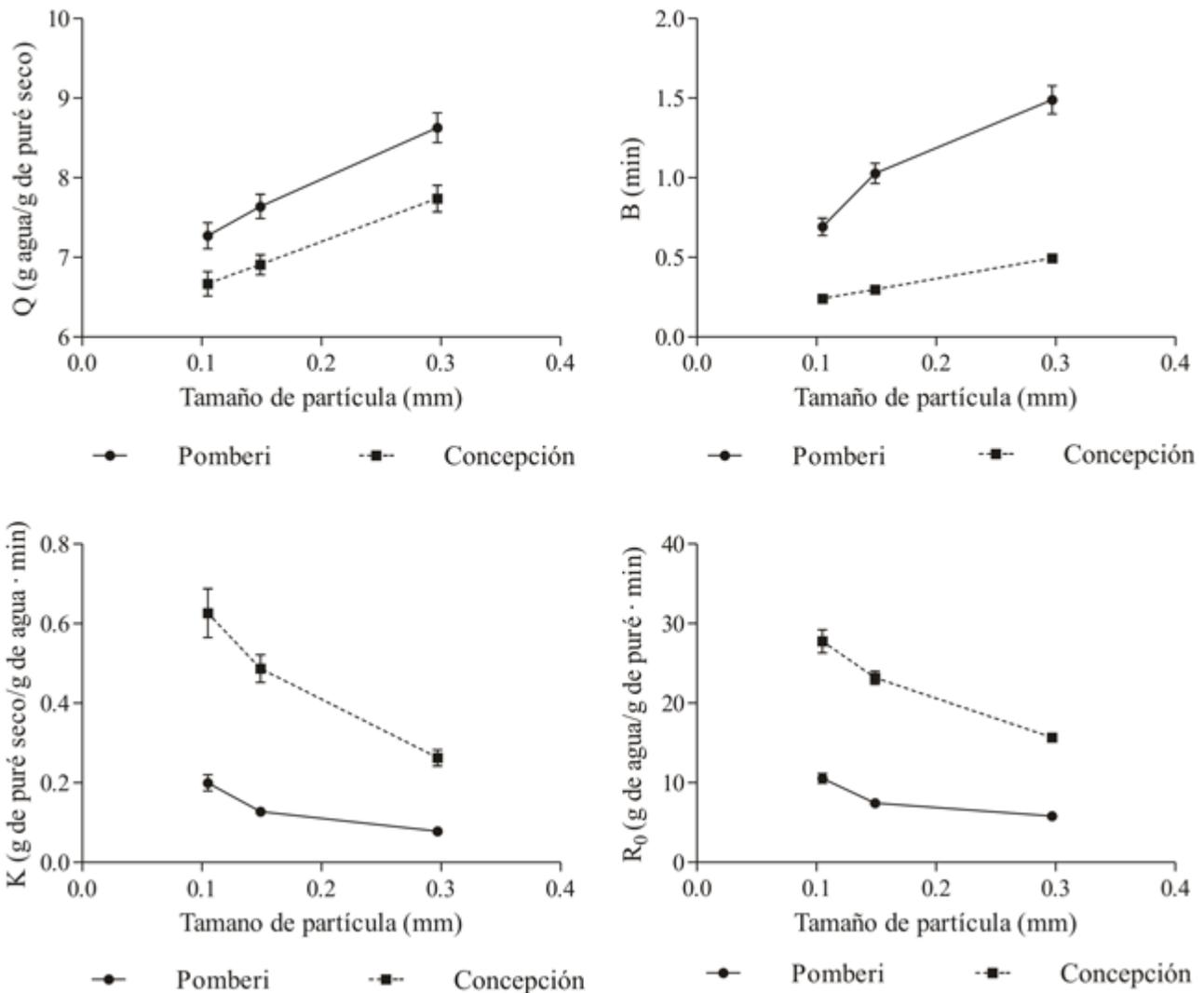
El ANOVA sobre los valores de Q y B, mostró que hubo diferencias significativas en relación a los tamaños de partículas para cada variedad de puré de mandioca estudiado ( $p < 0,05$ ). Los valores de Q y B, aumentaron cuando aumentó el tamaño de las partículas. Para la velocidad de adsorción de agua inicial

(R<sub>0</sub>), el ANOVA mostró diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en relación a los tamaños de partículas. A medida que las partículas tuvieron menor tamaño, los valores de R<sub>0</sub> aumentaron. Se observó, que las partículas de menor tamaño presentaron una constante específica de velocidad de adsorción

de agua (K) mayor. Entre variedades, hubo diferencias significativas (parámetros Q, B, K,  $R_0$  en Fig. 3) y de manera similar que en el modelo Exponencial, los valores predichos por el modelo Pilosof indicaron que la variedad ‘Pomberi’ alcanzó mayores valores de cantidad de agua adsorbida en el equilibrio (Q), pero la variedad ‘Concepción’ lo hizo a mayor velocidad inicial (K).

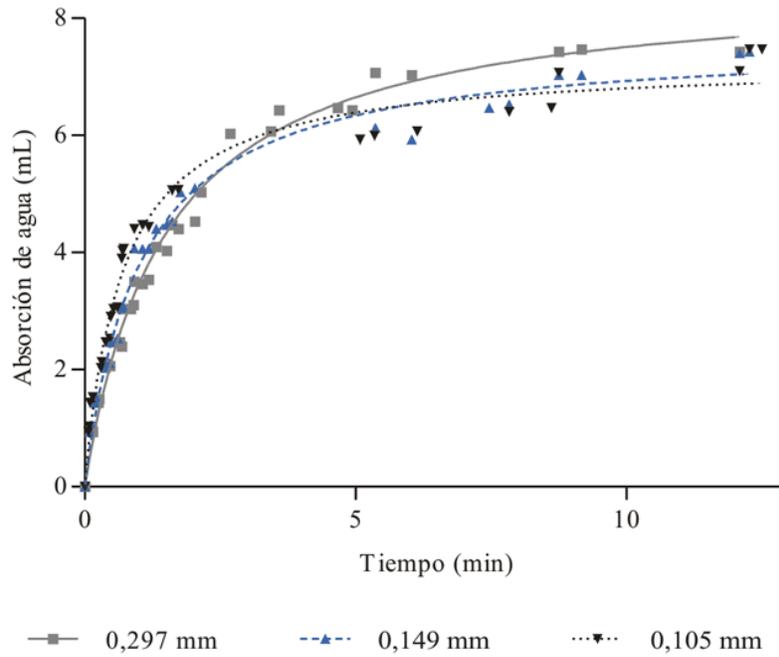
En las Figs. 4 y 5 se presentan las curvas de rehidratación de los purés deshidratados de

mandioca, variedades ‘Pomberi’ y ‘Concepción’ respectivamente, a los tres tamaños de partículas estudiados. Las curvas para ambas variedades fueron similares, ilustrando un proceso de rehidratación típico en vegetales (Lee *et al.*, 2006), por ejemplo, zanahoria (*Daucus carota*) (Melquíades *et al.*, 2009) y papa cultivares Agria, Satina y Kenebec (Salimi-Hizaji *et al.*, 2010). El agua fue adsorbida rápidamente al inicio del proceso y luego la adsorción disminuyó gradualmente hasta alcanzar un valor de equilibrio.



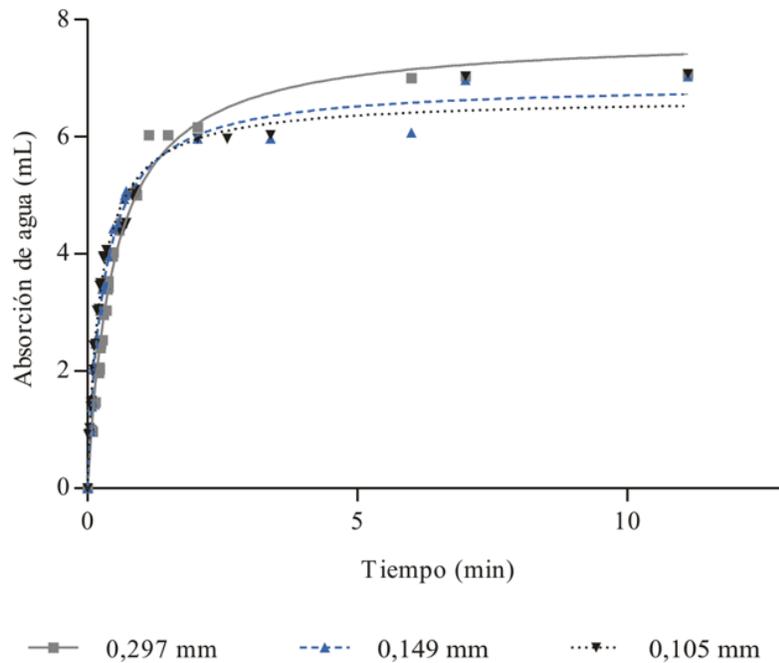
Los puntos de coordenadas representan el valor promedio de tres repeticiones y las barras el error estándar.

**Figura 3.-** Parámetros Q, B, K y  $R_0$  del modelo de Pilosof. Diferencias entre variedades.



Los puntos de coordenadas representan el valor promedio de tres repeticiones.

**Figura 4.-** Ajuste al modelo de Pilosof *et al.* (1985) Puré de mandioca variedad ‘Pomberi’.



Los puntos de coordenadas representan el valor promedio de tres repeticiones.

**Figura 5.-** Ajuste al modelo de Pilosof *et al.* (1985). Puré de mandioca variedad ‘Concepción’.

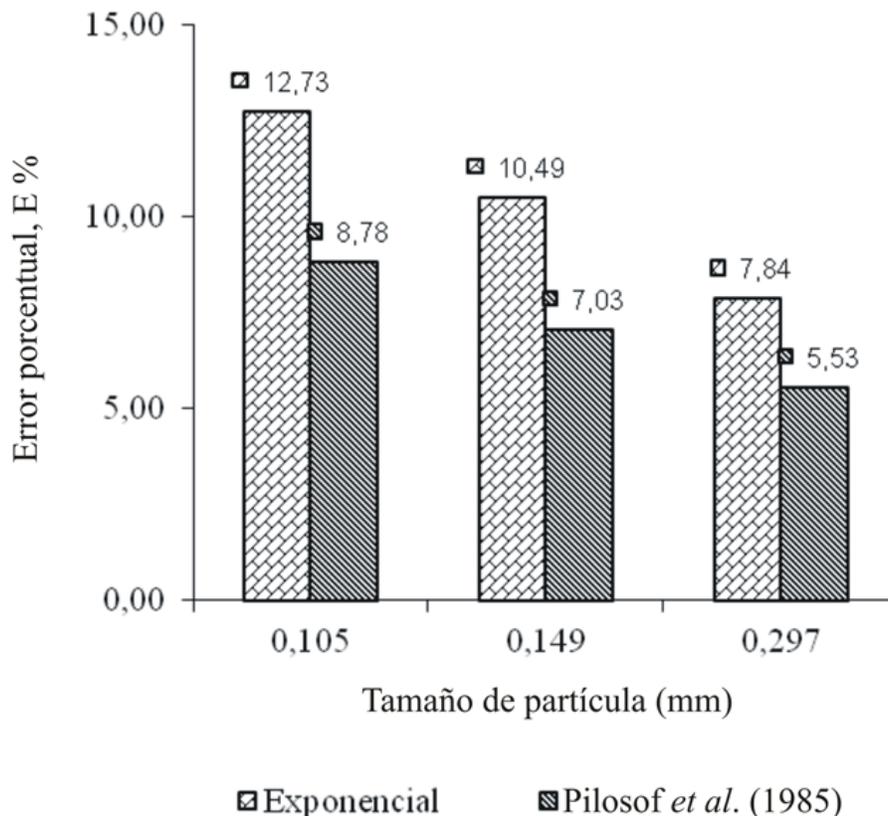
### Bondad de ajuste de los modelos

Los criterios utilizados para evaluar la bondad de ajuste fueron las magnitudes del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), RMSE y error porcentual. Cuanto más alto es el valor del coeficiente de determinación y más bajo son los valores de RMSE y E %, mejor será la bondad del ajuste de los datos experimentales al modelo.

Los valores de  $R^2$  fueron mayores a 0,98 en el modelo de Pilosof para las dos variedades en todos los tamaños de partículas estudiados y los valores de RMSE y MBE fueron semejantes. Se observó diferencias solamente

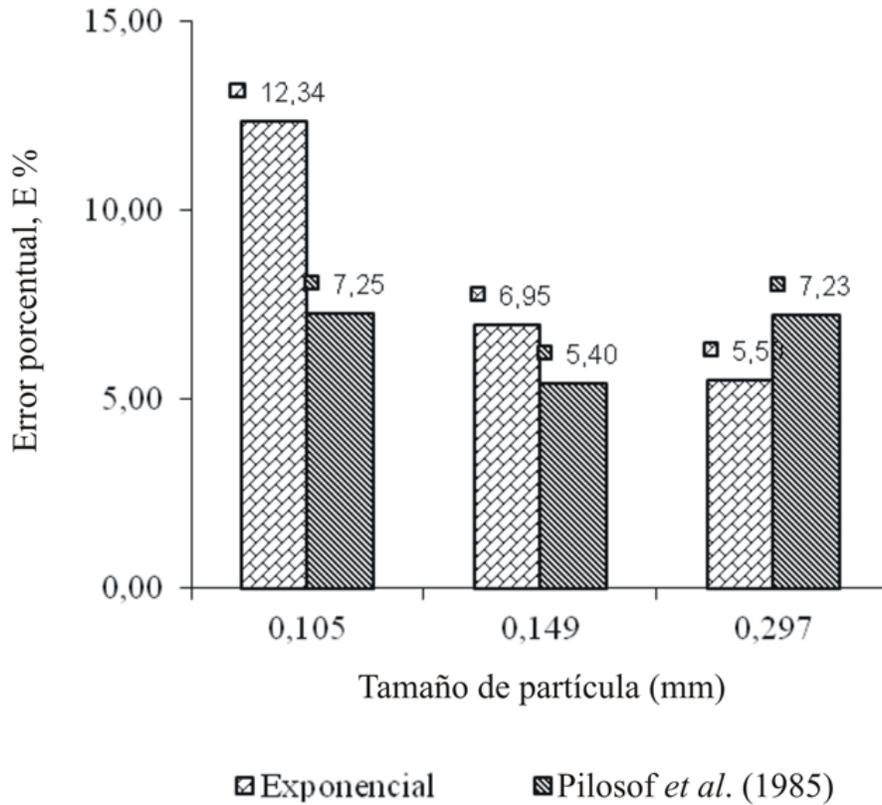
en los valores del E % (Cuadros 3 y 4).

Las Figs. 6 y 7 se presentan los valores de los errores porcentuales en forma de histogramas en función de los diferentes tamaños de partículas, para cada modelo estudiado, para las variedades de puré de mandioca ‘Pomberi’ y ‘Concepción’, respectivamente. Los histogramas exhibieron que, el modelo de Pilosof presentó valores de E % menores al 10 % para todos los tamaños de partículas y para ambas variedades, en tanto el modelo exponencial no presentó muy buen ajuste, debido a que se obtuvieron valores superiores al 10 % en la mayoría de los casos.



Los valores son promedios de tres repeticiones.

**Figura 6.-** Valores de los E % para cada modelo y para las diferentes partículas de puré de mandioca de la variedad ‘Pomberi’.



Los valores son promedios de tres repeticiones.

**Figura 7.-** Valores de los E % para cada modelo y para las diferentes partículas de puré de mandioca de la variedad ‘Concepción’.

### CONCLUSIONES

En el proceso de rehidratación del puré deshidratado de mandioca, el Índice de Adsorción de Agua aumentó con el incremento de la temperatura y se observó mayor capacidad de retención de agua en el puré deshidratado de la variedad ‘Pomberi’.

Las cinéticas de adsorción de agua se correspondieron con un proceso de rehidratación típico en el que el agua es adsorbida rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente hasta alcanzar un valor de equilibrio. La bondad de ajuste reflejó que los modelos Exponencial y de

Pilosof pueden ser usados para describir adecuadamente el proceso de rehidratación del puré de mandioca deshidratado.

El tamaño de partícula y la variedad de mandioca influyó significativamente en la cinética de adsorción de agua. Los parámetros cinéticos indicaron, en ambos modelos, que cuando aumentó el tamaño de partícula aumentó la capacidad de adsorción de agua y disminuyó la velocidad de adsorción. El puré de la variedad ‘Pomberi’ alcanzó mayores valores en el equilibrio, en tanto el puré de la variedad ‘Concepción’ adsorbió el agua más rápidamente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashogbon, A.O. and Akintayo, E.T. 2012. Morphological, functional and pasting properties of starches separated from rice cultivars grown in Nigeria. *International Food Research Journal*. 19(2):665-671.
- Bauman, H. 1966. Apparatur nach Baumann zur Bestimmung der Flüssigkeitsaufnahme von pulvrigen Substanzen. *Fette, Seifen, Anstrichmittel*. 68(9):741-743.
- Bressani, R. and Estrada-Ligorria, Luis. 1994. Effect of lime cooking of grain amaranth on selected chemical components and on its protein quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 42(9):1998-2001.
- Brou, Kouakou; Camara, Fatou; N'Dri, Yao Denis, Akaffou-N'Guessan, Lucien Marius and Djeni, N'Dédé, Théodore. 2008. Effect of two milling techniques and flours particle size on some physicochemical properties of millet flour. *Journal of Food Technology*. 6(6):231-236.
- Brousse, M.; Nieto, A.; Linares, R.; Paredes, A.; Valdez, E. y Vergara, L. 2009. Estudio del equilibrio y cinética de la adsorción de agua del puré deshidratado de mandioca. En *Trabajos completos presentados al III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*. 15-17 Abril. (pp. 28-34). Córdoba, Argentina. ISBN: 978-987-24620-8-6.
- Brousse, María; Vergara, María; Paredes, Ana; Valdez, Eusebia; Linares, Andrés y Nieto, Andrea. 2010. Isoterma de sorción de humedad del puré deshidratado de mandioca a diferentes temperaturas. En *VI Congreso Argentino de Ingeniería Química*. 26-29 Septiembre. (ID 1043). Mar del Plata, Argentina.
- Brumovsky, Luis A.; Hartwig, Vanessa G. y Horianski, Marta. 2008. Evaluación instrumental de propiedades sensoriales en raíces de mandioca preservadas por tecnología de obstáculos. *Revista de Ciencia y Tecnología (Universidad Nacional de Misiones, Argentina)*. N° 10.b. 16 p.
- Brumovsky, Luis A., y Fretes, Raquel M. 2008. Efectos de diferentes factores de estrés sobre la supervivencia de *Staphylococcus aureus* en mandioca preservada. *Revista de Ciencia y Tecnología (Universidad Nacional de Misiones, Argentina)*. N° 10.b. 11 p.
- Fennema, O.R. 1980. *Química de los alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acirbia, S. A.
- García-Pascual, Pablo; Sanjuán, Nieves; Melis, Ricardo and Mulet, Antonio. 2006. *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modeling. *Journal of Food Engineering*. 72(4):346-353.
- Grabowskia, J.A.; Truong, V.-D. and Daubert, C.R. 2008. Nutritional and rheological characterization of spray dried sweetpotato powder. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie (LWT) - Food Science and Technology*. 41(2):206-216.
- Hernández-Medina, Marilyn; Torruco-Uco, Juan Gabriel; Chel-Guerrero, Luis y Betancur-Ancona, David. 2008. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia de Alimentos (Brasil)*. 28(3):718-726.
- Ibarz, Albert y Barbosa-Cánovas, Gustavo V. 2005. *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. España: Ediciones Mundi-Prensa. pp. 583.
- Izidoro, Dayane Rosalyn; Sierakowski, Maria Rita; Haminiuk, Charles Windson Isidoro; de Souza, Clayton Fernandes and Scheer, Agnes de Paula. 2011. Physical and chemical properties of ultrasonically, spray-dried green banana (*Musa cavendish*) starch. *Journal of Food Engineering*. 104(4):639-648.
- Kaur, Maninder; Sandhu; Kawaljit Singh and Lim, Seung Taik. 2010. Microstructure,

- physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starches from different Indian lentil (*Lens culinaris*) cultivars. *Carbohydrate Polymers*. 79(2):349-355.
- Krokida, M.K. and Marinos-Kouris, D. 2003. Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*. 57(1):1-7.
- Lee, Kuek Tze; Farid, Mohammed and Nguang, Sing Kiong. 2006. The mathematical modelling of the rehydration characteristics of fruits. *Journal of Food Engineering*. 72(1):16-23.
- Lewicki, Piotr P.; Witrowa-Rajchert, Dorota and Mariak, Jolanta. 1997. Changes of structure during rehydration of dried apples. *Journal of Food Engineering*. 32(4):347-350.
- Lewicki, Piotr P. 1998. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: a review. *International Journal of Food Properties*. 1(1):1-22.
- Marín-B., Eduardo; Lemus-M., Roberto; Flores-M., Verónica y Vega-G., Antonio. 2006. La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*. 33(3):527-538.
- Maskan, Medeni. 2002. Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. *Journal of Food Engineering*. 52(4):337-341.
- McMinn, W.A.M. and Magee, T.R.A. 1997. Physical characteristics of dehydrated potatoes-Part II. *Journal of Food Engineering*. 33(1-2):49-55.
- Mejía de Tafur, María Sara. 2002. Fisiología de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). En *La yuca en el tercer milenio. Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. (pp. 34). Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Melquíades, Yendi I.; López, Clara y Rosas, Marta E. 2009. Estudio de la cinética de rehidratación de zanahoria (*Daucus carota*) deshidratadas. *Información Tecnológica*. 20(3):65-72.
- Nijhuis, N.H.; Torringa, E.; Luyten, H.; René, F.; Jones, P.; Funebo, T. and Ohlsson, T. 1996. Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. *Drying Technology*. 14(6):1429-1457.
- Park, Kil Jin; Vohnikova, Zenka and Brod, Fernando Pedro Reis. 2002. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*. 51(3):193-199.
- Peleg, M. 1988. An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*. 53(4):1216-1217.
- Pilosof, A.M.R.; Boquet, R. and Bartholomai, G.B. 1985. Kinetics of water uptake by food powders. *Journal of Food Science*. 50(1):278-279.
- Putri, W.D.R.; Haryadi, D.W.; Marseno and Cahyanto, M.N. 2011. Effect of biodegradation by lactic acid bacteria on physical properties of cassava starch. *International Food Research Journal*. 18(3):1149-1154.
- Ramos, I.N.; Brandão, T.R.S. and Silva, C.L.M. 2003. Structural changes during air drying of fruits and vegetables. *Food Science and Technology International*. 9(3):201-206.
- Rocha, Thaís de Souza; Carneiro, Ana Paula de Almeida y Franco, Celia Maria Landi. 2010. Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. *Ciência e Tecnologia de Alimentos (Brasil)*. 30(2):544-551.
- Rodríguez-Sandoval, Eduardo; Fernández-Quintero, Alejandro; Alonso-Alcalá, Lisímaco y Ospina-Patiño, Bernardo. 2006. Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. *Ingeniería & Desarrollo*. 19:17-30.

- Ruales, Jenny; Valencia, Silvia and Nair, Baboo. 1993. Effect of processing on the physico-chemical characteristics of quinoa flour (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Starch/Stärke*. 45(1):13-19.
- Santelia, Diana and Zeeman, Samuel C. 2011. Progress in Arabidopsis starch research and potential biotechnological applications. *Current Opinion in Biotechnology*. 22(2):271-280.
- Saguay, I. Sam; Marabi, Alejandro and Wallach, Rony. 2005. New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid transport in porous media. *Trends in Food Science & Technology*. 16(11):495-506.
- Salimi-Hizaji, A.; Maghsoudlou, Y. and Jafari, S.M. 2010. Application of Peleg model to study effect of water temperature and storage time on rehydratation kinetics of air dried potatoes cubes. *Latin American Applied Research*. 40(2):131-136.
- Singh, B.P.N. and Kulshrestha, S.P. 1987. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. *Journal of Food Science*. 52(6):1538-1541.
- Sopade, P.A.; Xun, Pang Yu; Halley, P.J. and Hardin, M. Equivalence of the Peleg, Pilosof and Singh-Kulshrestha models for water adsorption in food. *Journal of Food Engineering*. 78(2):730-734.
- Torgersen, H. and Toledo, R.T. 1977. Physical properties of protein preparations related to their functional characteristics in comminuted meat systems. *Journal of Food Science*. 42(6):1615-1620.
- Truong, Van-Den and Avula, Ramesh Y. 2010. Sweet potato purees and dehydrated powders for functional food ingredients. In *Sweet potato: post harvest aspects in food, feed and industry*. (pp. 117, 118). New York: Nova Science Publishers, Inc. ISBN 978-1-60876-343-6.
- Vargas-Aguilar, Pedro. 2010. Obtención de almidón fermentado a partir de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad Valencia, factibilidad de uso en productos de panadería. *Tecnología en Marcha*. 23(3):15-23.
- Vega-Gálvez, Antonio; Lara-Aravena, Elena y Lemus-Mondaca, Roberto. 2006. Isotermas de adsorción de harina de maíz. *Ciência e Tecnologia de Alimentos (Brasil)*. 26(4):821-827.
- Weerts, A.H.; Martin, D.R.; Lian, G. And Melrose, J.R.. 2005. Modelling the hydration of foodstuffs. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 13(2):119-128.
- Willard, Miles J. Jr.; Cording, James Jr.; Eskew, R.K.; Edwards, P.W. and Sullivan, John F. 1956. Potato flakes. A new form of dehydrated mashed potatoes. Review of pilot plant process. *American Journal of Potato Research*. 33(1):28-31.