



Identificación del Trabajo	
Área:	Ingeniería de Procesos, Biotecnología y Tecnología de Alimentos
Categoría:	Alumno
Regional:	Rosario

## Alimentos de preparación instantánea a partir de la liofilización de arroz. Obtención de parámetros de proceso mediante ajuste de datos a modelo matemático.

**César BRUGUEZI, Iván CHABABO, Mariano MUJICA, Analía OSORES**

*Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Alimentos (CIDTA). Facultad Regional Rosario, UTN. Zeballos 1341 y Área Tecnología de los Alimentos. Departamento Tecnología. Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas. UNR. Suipacha 531.*

E-mail de autores: [cesar-bruguezi@hotmail.com](mailto:cesar-bruguezi@hotmail.com), [ivanhababo@gmail.com](mailto:ivanhababo@gmail.com), [mmujica96@gmail.com](mailto:mmujica96@gmail.com), [analiaoosores@hotmail.com.ar](mailto:analiaoosores@hotmail.com.ar)

*Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección de la Dra. Griselda Ballerini, en el marco del proyecto "Liofilización de preparaciones alimenticias" (2019 – 2023). (Convenio específico UTN – UNR, firmado 19/06/2019).*

### Resumen

Con el objeto de diseñar alimentos instantáneos a base de arroz, se liofilizó arroz parbolizado. La experiencia se realizó en liofilizador de mesada registrándose la temperatura de la cámara de liofilización, así como la humedad y la temperatura de las muestras. Esta última variable permitió establecer un tiempo de tratamiento de 12 horas. Mediante microscopía electrónica de barrido se estimó el diámetro de poro ( $17,6\mu\text{m}$ ) y la porosidad (0,97) del arroz liofilizado. Estos datos, junto con la humedad registrada se ajustaron a un modelo matemático, utilizando software de análisis de datos, para obtener un coeficiente de difusión efectiva de  $2,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . El arroz liofilizado se utilizó para elaborar postre y sopa de características similares a productos del mercado argentino. Ambos alimentos fueron analizados texturométricamente y su evaluación sensorial con panel semientrenado permitió establecer perfiles de preferencia del consumidor, que resultaron favorables para los alimentos instantáneos con relación a los comerciales.

**Palabras Claves:** Arroz; Liofilización; Modelo; Texturometría.

### 1. Introducción.

Las operaciones de deshidratación son ampliamente usadas para la preservación de los alimentos ya que remueven el agua, previenen el desarrollo de microorganismos y limitan las reacciones físicas, químicas y microbiológicas durante el almacenamiento. Entre los métodos de secado usados industrialmente, el liofilizado es considerado uno de los más avanzados para la deshidratación de alimentos de alto valor comercial y sensibles al calor, ya que minimiza la contracción y produce materiales altamente porosos, mantiene la calidad nutricional, el color, el aroma y el sabor, así como las buenas propiedades de rehidratación en comparación con otras técnicas convencionales de secado.

La liofilización es el proceso por el cual se extrae la humedad de un sólido, previamente congelado, mediante la sublimación del hielo a presiones más bajas que la correspondiente al punto triple del agua ( $\cong 610,6 \text{ Pa}$ ). Cuando se realiza el secado mediante liofilización se distinguen tres etapas: la etapa 1 (conductiva), por calentamiento de la muestra y alta velocidad de sublimación, aunque sólo representa

alrededor del 15% del tiempo total de tratamiento; la etapa 2 (primera fase difusiva), con un descenso importante de la velocidad de sublimación por formación de capa seca y porosa que opone resistencia al flujo de vapor y calor necesario para el secado. De acuerdo a Millman et al. (1984), estas dos etapas, durante las cuales se lleva a cabo la remoción del 75% al 90% de agua del producto, constituyen el secado primario. Según Kawasaki et al. (2019), la etapa 3 (segunda fase difusiva), a la que se llega luego de un importante aumento de la temperatura y en la que se extrae el agua de constitución del material, la velocidad de difusión se aproxima a cero y el tiempo para lograr la eliminación total del agua es tan extenso que resulta industrialmente inviable, constituye el secado secundario.

Según Bui et al. (2018) el arroz liofilizado es una forma de arroz de preparación instantánea que tiene un contenido de humedad muy bajo, es liviano y tiene una larga vida útil. Estas cualidades lo hacen especialmente adecuado para alimentos de emergencia, raciones militares, comida para astronautas, entre otros. En estas aplicaciones, la velocidad y la facilidad de preparación son principalmente apreciadas y su adaptabilidad a los paladares salados y dulces con la adición de condimentos adecuados, los hacen útiles y versátiles. En el mercado argentino, existen alimentos salados elaborados a base de arroz, tales como sopas o guisos que necesitan un período de calentamiento y luego un hervor de 15 minutos previos a su consumo, y alimentos dulces como el postre criollo (arroz con leche) que tiene una vida útil limitada.

Los ingenieros prueban las condiciones operativas del liofilizado en equipos de escala laboratorio o piloto para encontrar las condiciones de operación de un determinado proceso. Es complicado hallar los parámetros operativos a escala industrial especialmente para grandes producciones. Un modelo matemático podría ser beneficioso para explorar las condiciones óptimas y reducir el tiempo requerido para la validación. Con el objeto de diseñar alimentos de preparación instantánea (alimentos instantáneos) a base de arroz, en este trabajo se liofilizó arroz parbolizado comercial (arroz con cáscara sometido a un remojo a 60°C y luego a una corriente de vapor que gelatiniza el almidón) previamente hervido durante 15 minutos. El producto incorporado como ingrediente de una sopa y un postre, se comparó con otros de similares componentes existentes en el mercado. Se los analizó texturométricamente y una evaluación sensorial permitió establecer condiciones de aceptabilidad del consumidor. Se obtuvieron parámetros de operación del proceso de secado primario ajustando los datos experimentales al modelo matemático propuesto.

## **2. Metodología.**

### *2.1 Liofilización*

Las experiencias se realizaron por duplicado y como materia prima se usó arroz parbolizado comercial de primera calidad. Se hirvieron 20 g de arroz durante 15 minutos en 500 mL de agua destilada. Transcurrido el tiempo de cocción se escurrió el sólido y se secó entre papel de filtro. De esta forma se obtuvieron muestras de 1,7 mm de espesor promedio que fueron congeladas a -20°C (freezer doméstico) durante 24 horas previo a la liofilización. Se utilizó un liofilizador de mesada (Liotop L101, Brasil), ilustrado en la Figura 1, que consta de compartimientos independientes que pueden ser retirados sin modificar la presión de vacío y varias bandejas en la cámara principal. Se colocó una muestra congelada sobre una de las bandejas de la cámara y se liofilizó. Este paso sirvió para monitorear la temperatura dentro de la muestra y en el interior de la cámara mediante termocupla y sensores Pt-100. Posteriormente, en cada uno de los compartimientos se colocó una muestra congelada sobre placa plástica y se inició la liofilización, acompañando la experiencia con un nuevo monitoreo de temperatura en el material. La liofilización se llevó a cabo de acuerdo a las características del liofilizador, temperatura ambiente de 25°C, 13,5 Pa de presión, generada por bomba de vacío (Dosivac DVR 140, Argentina) y -50°C de temperatura del condensador. Se determinó

(según técnica de AOAC 1990) la humedad inicial del arroz hervido y escurrido así como la humedad de las muestras que fueron extraídas del liofilizador, cada hora, hasta el final del proceso. Además, de cada una de las muestras extraídas se separó material que se usó para medir con micrómetro y evaluar estadísticamente el volumen del arroz. Los alimentos obtenidos con este arroz como ingrediente fueron analizados sensorial y texturométricamente tomando como contraparte dos productos del mercado preparados con ingredientes similares.



**Figura 1.** Liofilizador

## *2.2 Evaluación sensorial*

Como una de las principales características del arroz en un alimento es la masticabilidad, se la evaluó sensorialmente en el arroz liofilizado. Para ello, muestras del producto liofilizado fueron rehidratadas a 80°C en medio líquido (caldo y leche descremada reconstituida) y a diferentes tiempos hasta los 10 minutos evaluando hedónicamente el parámetro mencionado. El resultado de esta evaluación fue utilizado para la presentación del producto liofilizado en los estudios posteriores. El análisis sensorial hedónico se realizó a través de una prueba afectiva de comparación entre la sopa formulada y la sopa comercial, así como con el arroz con leche comercial y el formulado. Los atributos evaluados fueron olor, aspecto, color, sabor salado/dulce, masticabilidad, textura grasa, y calidad general. La escala hedónica fue de 10 puntos, siendo la puntuación asignada a las categorías: 1-2 para “me disgusta mucho”, 3-4 para “me disgusta”, 5-6 para “no me gusta ni me disgusta”, 7-8 para “me gusta” y 9-10 para “me gusta mucho”. Se consideró la aprobación del atributo evaluado con una puntuación promedio mayor a 7. Participaron de la prueba 10 evaluadores semientrenados. Los resultados procesados en Microsoft Office Excel 2010, permitieron generar perfiles de aceptación del consumidor.

## *2.3 Análisis texturométrico*

Se utilizó un texturómetro de mesada Mecmesin Multitest 2.5-d, como se observa en la Figura 2, equipado con una celda de carga AFG 100N y un émbolo plano. Muestras de arroz liofilizado rehidratado, en medio líquido a temperatura de 80°C, durante el tiempo determinado por análisis sensorial previo y escurrido se dispusieron de modo tal que llenara el tubo colector de la celda de extrusión. Sobre la muestra se efectuaron dos ciclos de compresión (fuerza = 50N), cada uno consistió en deslizar el émbolo hasta el final del tubo comprimiendo la muestra y luego retornarlo al punto de partida. El segundo ciclo se realizó de manera idéntica al primero. Los resultados fueron procesados mediante el programa SigmaPlot versión 11.0. A partir de los gráficos fuerza vs desplazamiento se obtuvieron los valores de dureza, adhesividad, cohesividad, y

elasticidad que fueron comparados con los homólogos obtenidos con muestras de los productos del mercado, preparados en las condiciones establecidas por el fabricante para su consumo. Un gráfico típico del procesamiento de datos brindados por el texturómetro se muestra en la Figura 3.



Figura 2. Texturómetro

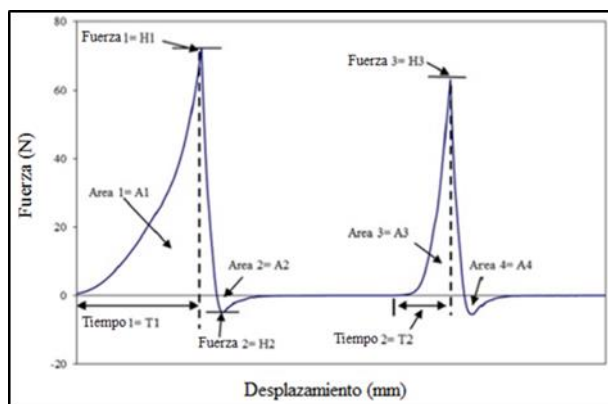


Figura 3. Curva típica de fuerza-desplazamiento para un test de doble compresión.

Los parámetros determinados fueron:

**Dureza (H1):** fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar (N).

**Cohesividad (A3/A1):** grado en que un alimento puede ser deformado antes de su ruptura.

**Adhesividad (A2):** trabajo necesario para despegar la muestra del plato de compresión (N x s).

**Elasticidad (T2/T1):** capacidad del alimento de retornar a su altura o forma original luego de ser sometido a una deformación

#### 2.4 Microscopía electrónica de barrido

Se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para visualizar la microestructura de los granos de arroz liofilizados. El material se cortó con una cuchilla con un espesor de 1 a 2 mm y se recubrió con oro. Las muestras se rociaron con partículas de oro, creando una capa con un espesor de 15 nm y se fotografiaron utilizando un microscopio de escaneo electrónico (AMR 1000 Leitz, Wetzlar, Germany) operado a 20 kV con resoluciones de 0,4 y 20 nanómetros. Las dimensiones de las regiones de interés, tales como vacíos, diámetro de poros y regiones densas, se determinaron mediante el examen de las imágenes digitales utilizando IMAGE-J Versión 1.52 Å. Del análisis de las imágenes SEM se estimó porosidad ( $\phi$ ), diámetro de poro ( $d_p$ ) y a partir de la porosidad se determinó la tortuosidad ( $\tau$ ).

#### 2.5 Modelo matemático

Para ajustar matemáticamente los datos experimentales del proceso de secado primario, se estableció que la cinética de secado está determinada por la difusión del agua en estado sólido desde el sustrato hacia el aire de la cámara. Según Crank (1975), la segunda ley de Fick (ec. 1) donde "x" representa el contenido de humedad, se adopta para representar el proceso estudiado.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \quad (\text{ec.1})$$

Esta ecuación se resuelve de acuerdo a la geometría de la materia prima y las condiciones iniciales. En este trabajo se consideró que: el sustrato posee una humedad inicial y una estructura uniforme, la muestra se analizó como placa plana infinita, sólo existe resistencia interna para la transferencia de masa, no hay encogimiento del sólido durante la deshidratación, se desprecian los efectos internos y externos para la transferencia de calor, se obtiene del medio el calor latente de sublimación, la difusión se efectúa unidireccionalmente,  $D_{ef}(T_s)$  es calculado a través del coeficiente de difusión de Knudsen ( $D_0$ ) y depende de  $\varphi$  y de  $\tau$ ,  $D_0$  se relaciona directamente con la microestructura del material a través de  $d_p$  y es función de la temperatura del frente seco del producto ( $T_s$ ). Bajo estos supuestos la solución matemática de la ec. 1 es

$$\frac{x(t)}{x_{t=0}} = \sum_{i=1}^n \frac{2v}{\lambda^2} e^{\left(-\frac{\pi}{2} \frac{D_{ef}(T_s) t}{a^2}\right)} \quad (\text{ec. 2})$$

donde, de acuerdo a Mahn et al. (2016), “a” es semiespesor de la muestra, “v” y “λ” dependen de la geometría del material. Nakagawa y Ochiai (2015), Mahn et al. (2016) y Vega et al. (2005), entre otros, tomaron el primer término de la sumatoria para obtener un modelo de difusividad modificado que se utilizó en este trabajo, fijando las siguientes condiciones:

$$x_{t=0} = 1,38 \text{ g de agua x g materia seca}^{-1}; 0 \leq t \leq 42300 \text{ s}; 253 \text{ K} \leq T_s \leq 278 \text{ K}; \\ a = 0,00085 \text{ m}; v=1,25; \lambda=\frac{\pi}{2}$$

$$H_{ad}(t, T_s) = \frac{x(t)}{x_{t=0}} = \frac{8 \cdot 1,25}{\pi^2} e^{\left(-\frac{\pi \cdot D_{ef}(T_s) t}{8 \cdot 0,00085^2}\right)}$$

$$D_{ef}(T_s) = \frac{\varphi}{\tau} D_0(T_s)$$

$$\tau = -0,5191 \varphi^3 + 0,8790 \varphi^2 - 1,1657 \varphi + 1,8058 \quad \text{Nabovati y Sousa (2007)}$$

$$D_0(T_s) = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8 R T_s}{\pi P M_{H_2O}}} d_p$$

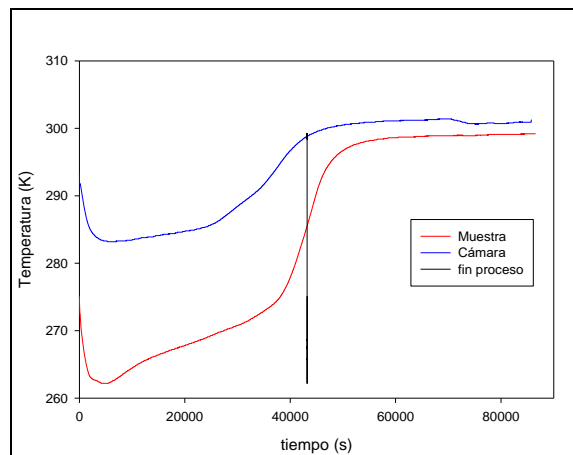
donde R es la constante universal de los gases y  $PM_{H_2O}$  es el peso molecular del agua. Los valores de  $\varphi$  y de  $d_p$  se obtuvieron mediante el análisis de las SEM.

El modelo propuesto fue programado en SigmaPlot versión 11.0 y en Mathematica versión 10 para obtener el valor de  $D_{ef}$  correspondiente al mejor ajuste de los datos experimentales.

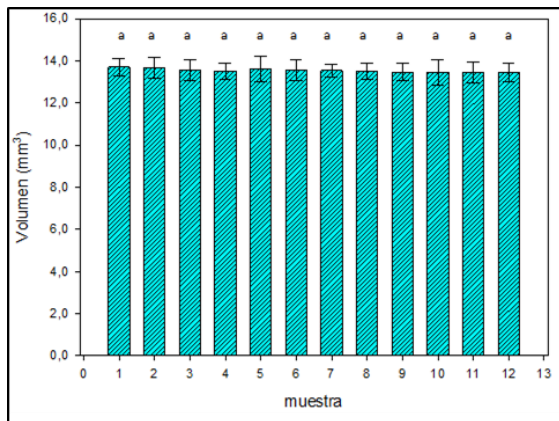
## 2.6 Análisis estadístico

Los efectos estandarizados de los factores experimentales y su significancia (95% de confianza) fueron calculados usando el programa StatgraphicsTM Centurion XVII. Las diferencias estadísticamente significativas entre el volumen del arroz antes y después de liofilizado se determinaron mediante la prueba de Tukey.

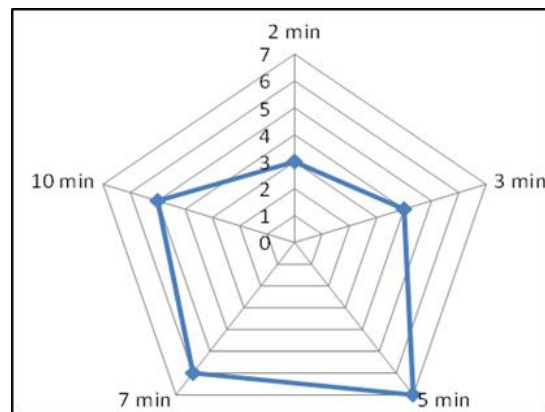
### 3. Resultados



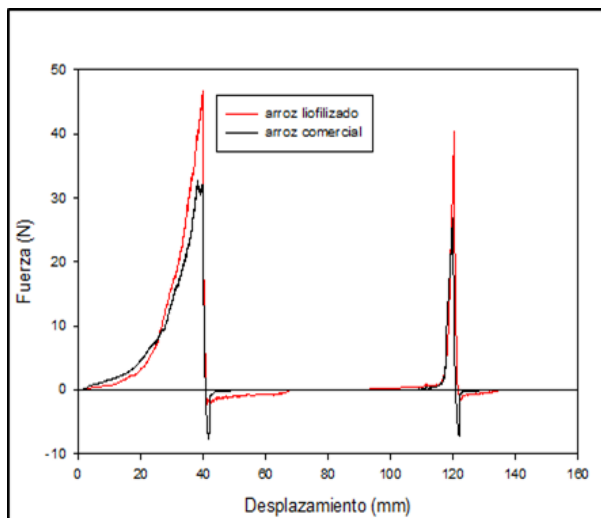
**Figura 4.** Variación de la temperatura con el tiempo de liofilizado en la cámara y en la muestra.



**Figura 5.** Variación de volumen por muestra. Igual letra representa estadísticamente igual volumen.



**Figura 6.** Aceptabilidad del consumidor para la masticabilidad del arroz liofilizado según el tiempo de rehidratación en líquido a 80°C.

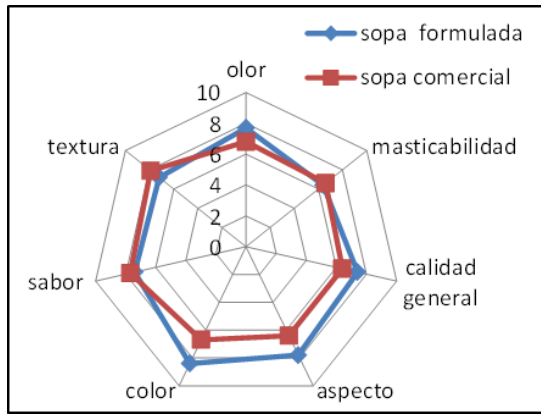


**Figura 7.** Gráfico de datos del texturómetro.

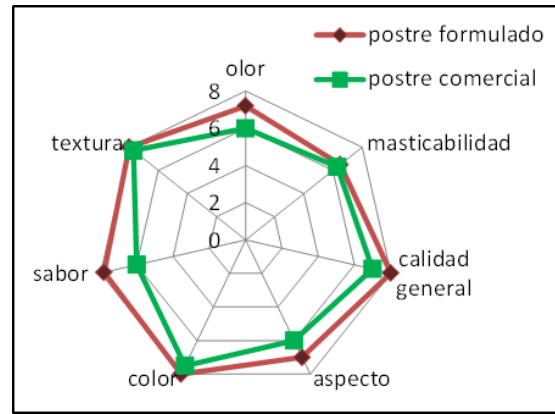
**Tabla I.** Parámetros texturométricos

Parámetro	A	B
dureza (N)	31,0±0,2	47,0±0,1
adhesividad (N s)	26,6±0,1	12,4±0,2
cohesividad	0,2±0,02	0,2±0,01
elasticidad	0,6±0,01	0,7±0,01

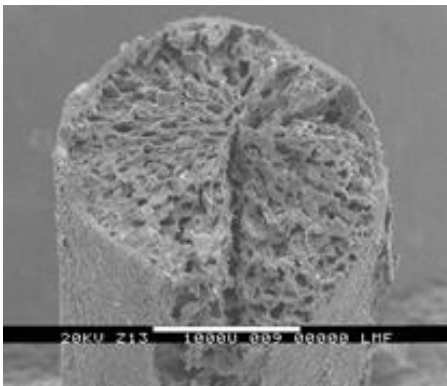
A: Arroz de sopa comercial hervido durante 15 min y escurrido  
 B: Arroz liofilizado rehidratado durante 5 min



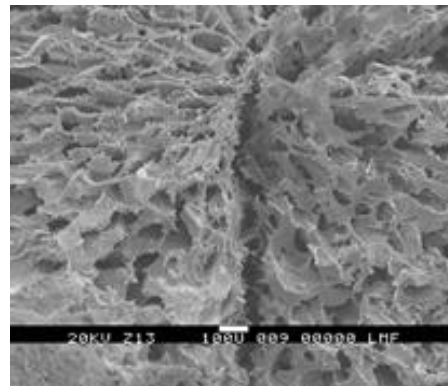
**Figura 8.** Gráfico comparativo de aceptabilidad del consumidor.



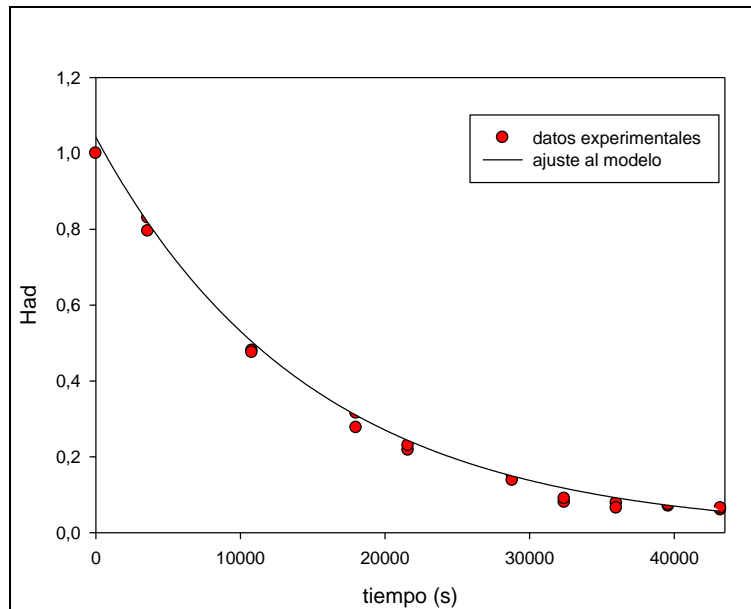
**Figura 9.** Gráfico comparativo de aceptabilidad del consumidor.



**Figura 10.** SEM arroz liofilizado 50x.



**Figura 11.** SEM arroz liofilizado 100x.



**Figura 12.** Mejor ajuste de datos experimentales al modelo propuesto.



**Tabla II.** Análisis de los efectos estandarizados de los datos experimentales con un 95% de confianza.

$D_{ef} = 2,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$		R	0,9874		
Análisis de varianza:					
	GL	SC	SCM	F	P
Regression	1	1,3064	1,3064	4414,4406	<0,0001
Residual	23	0,0068	0,0003		
Total	24	1,3132	0,0547		

#### 4. Discusión

En el liofilizador (Figura 1), se colocó una muestra congelada que se deshidrató durante 24 h. En este tiempo se monitoreó la temperatura en la cámara y en la muestra que fueron graficadas vs el tiempo de liofilizado (Figura 4). Este paso sirvió para determinar en forma teórica el fin del período de secado primario que se tomó en 12 horas, tiempo corresponde a la máxima pendiente de la curva temperatura de arroz vs tiempo que se muestra en la Figura 4. Al respecto, Bui et al. (2018), Ratti (2013) y Orrego (2009) utilizaron el monitoreo de la temperatura en el sustrato para establecer el tiempo final del proceso de liofilización. La liofilización posterior, con el resto de las muestras congeladas, se extendió durante 12 h y durante la experiencia se extrajeron muestras cada 60 min para determinar humedad que se expresó en base seca y en forma relativa a la humedad en base seca inicial (1,38 g de agua x g de materia seca<sup>-1</sup>). La humedad final fue 0,06 g de agua x g de materia seca<sup>-1</sup>.

Rhim et al. (2011) y Oikonomopoulou et al. (2011)<sub>(a y b)</sub> utilizaron micrómetro para determinar las dimensiones del material liofilizado, esta técnica fue usada en nuestro trabajo para evaluar el volumen de varios granos de cada muestra. Estos datos se graficaron vs el número de muestra y se evaluaron estadísticamente (Figura 5) aplicando test de Tukey (StatGraphicsTM Centurión XVII y Sigma Plot 11.0). Las conclusiones de este análisis permitieron considerar contracción de muestra nula durante la liofilización del arroz parbolizado elegido, lo que está de acuerdo con la información suministrada por Rhim et al. (2011), quienes afirman que la contracción de la muestra es considerable en alimentos fibrosos carnes o verduras, pero no se ha registrado en la liofilización de arroz parbolizado.

La evaluación de la masticabilidad del arroz liofilizado (Figura 6), vinculada con su tiempo de rehidratación constituye un parámetro necesario para considerar un alimento instantáneo. Para evaluarla se efectuó una prueba sensorial hedónica en la cual se determinó que el tiempo promedio de rehidratación, para una buena masticabilidad se encuentra en los 5 minutos aproximadamente, valor que alcanza los 7 puntos de aceptación del consumidor dentro de la escala hedónica propuesta. Este tiempo fue usado para la rehidratación del arroz liofilizado en los siguientes análisis.

Para el análisis texturométrico, el alimento comercial y el instantáneo se prepararon según sus protocolos respectivos, se escurrieron y se colocaron secuencialmente en la celda de carga (Figura 2). Los datos brindados por texturómetro se graficaron (Figura 7) y a partir del gráfico se obtuvieron los valores de los parámetros que se muestran en Tabla I. El análisis de esta tabla permite observar que, si bien la dureza es mayor en el arroz liofilizado que en el comercial, ésta es bien aceptada por el consumidor. Es de destacar que el arroz liofilizado tiene menor adhesividad que el producto comercial lo que lo hace especialmente atractivo para un alimento. En la Figura 8 y Figura 9 se muestran las evaluaciones hedónicas de ambas sopas y ambos postres. Con relación a las opiniones obtenidas, todos los productos entran en el rango de



aceptabilidad del consumidor. La sopa formulada supera, en evaluación hedónica, al producto comercial en parámetros tales como olor, aspecto, color y textura, mientras que el sabor y la masticabilidad son similares en los alimentos comparados. Con respecto al postre, los dos productos ostentan semejante textura, masticabilidad y color, sin embargo el postre formulado muestra mejor índice de aceptabilidad en el resto de los parámetros evaluados (Figura 9).

La SEM del arroz liofilizado, para dos ampliaciones, se presenta en la Figura 10 y Figura 11 y permitió, mediante análisis de imágenes, determinar el  $d_p$  que resultó  $17,6 \mu\text{m}$ . Este valor es similar a los obtenidos por Karathanos et al. (1996) y Krokida y Maroulis (1998). Rhim et al. (2011) informaron  $12,8 \mu\text{m}$  como  $d_p$  trabajando con arroz parbolizado. Oikonomopoulou et al. (2011)<sup>(a y b)</sup> estimaron  $d_p$  en  $16 \mu\text{m}$  investigando otro tipo de arroz. Por otra parte, Nakagawa y Ochiai (2015) refirieron  $146 \mu\text{m}$  para el  $d_p$  en cubos de manzanas, lo cual difiere significativamente de nuestros resultados posiblemente debido al tamaño de la muestra con la que trabajaron y a lo fibroso de su estructura. También, por análisis de imágenes se estimó  $\phi$ , que fue  $0,97$ , valor similar al informado por Rhim et al. (2011). A partir de  $\phi$  se calculó la tortuosidad ( $\tau$ ), que resultó ser  $1,03$ . Con relación a este parámetro, Li et al. (2007) y Nakagawa y Ochiai (2015) tomaron el valor de  $2$  trabajando con láminas de manzanas liofilizadas y Reyes e Iglesia (1991) adoptaron tortuosidad aproximada a  $1$ , investigando pellets. Los valores de  $d_p$ ,  $\phi$  y  $\tau$  se introdujeron en el modelo de difusividad modificada propuesto para el ajuste de los datos experimentales. Los valores de  $H_{ad}(t, T_s)$  se graficaron vs el tiempo de liofilización (Figura 12) y se ajustaron al modelo obteniéndose un valor para  $D_{ef}$  igual a  $2,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$ . La bondad del ajuste al modelo propuesto se analizó mediante Test ANOVA (Tabla II). El  $D_{ef}$  hallado en este trabajo es similar al informado por Onuoha et al. (2013) que se ubicó entre de  $2,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$  y  $5,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \times \text{s}^{-1}$  trabajando con arroz parbolizado.

## 5. Conclusiones

Se formularon dos alimentos instantáneos, sopa y arroz con leche. Ambos productos están en condiciones de competir en el mercado, superando a los ya existentes en varios atributos de aceptabilidad del consumidor. Estos alimentos tienen una vida útil de varios años y el tiempo de preparación es de solo 5 minutos. Por su simple y rápida elaboración ambos productos pueden usarse como raciones de emergencia. El ajuste de los datos experimentales a un modelo matemático permitió determinar los parámetros de este proceso necesarios para su posterior validación.

## Reconocimientos.

Queremos expresarle nuestro profundo agradecimiento a nuestra directora de trabajo Dra. Griselda Ballerini y al Dr. Nestor Delorenzi por brindarnos los recursos, la ayuda, la comprensión y el estímulo que hicieron posible la realización de este trabajo.

## Bibliografía

- Bui, L., Coada, R., Stanley, R. (2018). Properties of rehydrated freeze-dried rice as a function of processing treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 91, 143-150.
- Crank, J. (1975). *The mathematical of diffusion*. 2<sup>da</sup> ed. Oxford: Clarendon Press.
- Karathanos, V., Kanellopoulos, N., Belessiotis, V. (1996). Development of porous structure during air-drying of agricultural plant products. *Journal of food engineering*, 29, 167-183.
- Kawasaki, H., Shimanouchi, T., Sawada, H., Hosomi, H., Hamabe, Y., Kimura, Y. (2019). Temperature measurement by sublimation rate as a process analytical technology tool in lyophilization. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 1-10.

- Krokida, M., Karathanos, V., Maroulis, Z. (1998). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 35, 369-380.
- Li, S., Stawczyk, J., Zbicinski, I. (2007). CFD model of apple atmospheric freeze drying at low temperature. *Drying Technology: An International Journal.*, 25(7-8), 1331-1339.
- Mahn, A., Román, J., Reyes, A. (2016). Efecto de la liofilización de brócoli pre-procesado sobre la cinética de secado y el contenido de sulforafano. *Información tecnológica*, 27, 95- 06.
- Millman, M., Liapis, A., Marchello, J. (1984). Guidelines for the desirable operation of batch freeze driers during the removal of free water. *Journal of Food Technology*, 19, 725-738.
- Nabovati, A. y Sousa, M. (2007). Fluid flow simulation in random porous media at pore level using lattice Boltzman Method. *Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(3), 226- 37.
- Nakagawa, K., Ochiai, T. (2015). A mathematical model of multi-dimensional freeze-drying for food products. *Journal of Food Engineering*, 161, 55-67.
- Oikonomopoulou, V., Krokida, M., Karathanos, V. (2011). Structural properties of freeze-dried rice. *Journal of Food Engineering*, 107, 326-333(a).
- Oikonomopoulou, V., Krokida, M., Karathanos, V. (2011). The influence of freeze drying conditions on microstructural changes of food products. *Procedia Food Science*, 1, 647-654. (b).
- Onuoha, L., Aviara, N., Abdulrahim, A., Suleiman, A. (2013). Influence of cultivar on the predictive performance of a moisture transport model developed for parboiled paddy drying. *Drying Technology: An International Journal*, 31, 494-506.
- Orrego Alzate, C. (2009). *Congelación y liofilización de alimentos*. Colombia: U.N. Colombia.
- Ratti, C. (2013). Capítulo III. En: *Handbook of food powders. Processes and properties*. Laval University, Canada: Woodhead Publishing Limited.
- Reyes, S., Iglesia, E. (1991). Effective diffusivities in catalyst pellets: New model porous structures and transport simulation techniques. *Journal of Catalysis*, 129, 457-472.
- Rhim, J., Koh, S., Mok, J. (2011). Effect of freezing temperature on rehydration and water vapor adsorption characteristics of freeze-dried rice porridge. *Journal of Food Engineering*, 104, 484-491.
- Vega, A., Andrés, A., Fito, P. (2005). Modeling the drying kinetics of red pepper (*Capsicum annuum L. cv Lamuyo*). *Información Tecnológica*, 16(6), 3-11.