

# 19TCA - SECADO CONVECTIVO DE ANANÁ CON APLICACIÓN DE PULSOS DE ENERGÍA DE MICROONDAS

FERNÁNDEZ, P.<sup>1</sup>; MASCHERONI, R.<sup>2</sup>; RAMALLO, L.<sup>1</sup>

1.IMAM (CONICET–Universidad Nacional de Misiones). Misiones. Argentina

2. CIDCA (CONICET-CCT y Universidad Nacional de La Plata) y MODIAL (FI-UNLP). La Plata. Argentina.

[lram@fceqyn.unam.edu.ar](mailto:lram@fceqyn.unam.edu.ar)

## Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación de pulsos de microondas sobre el secado convectivo de ananá, para establecer la condición de secado más favorable en términos de cinética de pérdida de agua de frutas de *Ananá Comosus* variedad Cayena Lisa cortado en placas de 6 mm de espesor. Se diseñaron nueve condiciones diferentes de deshidratación aplicando deshidratación osmótica a 40°C/50°Brix, energía de microondas de 800 W y 2450 MHz y secado con corriente de aire de 1 m/s y 60°C, en diferentes relaciones de tiempo microondas-tiempo convección forzada. Los resultados mostraron que la aplicación de pulsos de microondas al secado convectivo es un método efectivo para acortar el tiempo requerido para alcanzar cierto contenido de agua en fruta de ananá. De las condiciones ensayadas los mejores resultados se registraron con secado con pulsos de microondas de 20 s cada 60 minutos, donde el 10% del contenido de agua inicial se alcanza en 150 min mientras que con secado continuo dicha humedad se logra en 240 min. Se aplicó un modelo empírico (Ecuación de Page) para describir la cinética de secado, con apropiado ajuste de los resultados experimentales ( $r^2 \geq 0,96$ ).

## 1. Introducción

La deshidratación de alimentos es un método de preservación que se ha utilizado desde tiempos prehistóricos, pero en los últimos años se comenzaron a desarrollar métodos combinados de secado para suplir las desventajas del secado tradicional. Estos métodos mejoran la calidad del producto y en varios casos presentan la ventaja adicional de ahorro de energía (Simal *et al.*, 1997; Rahman y Lamb, 1991; Vega, 2003). La energía de microondas ofrece varias ventajas en comparación con los métodos convencionales de secado, como la velocidad de operación, ahorro de energía, control de procesos precisa y más rápida puesta en marcha, y en algunos casos, mejor calidad del producto final (Datta *et al.*, 2001; Maskan, 2001; Zang *et al.*, 2006). Uno de los inconvenientes de la utilización de microondas en el proceso de secado es que potencias excesivas pueden causar un calentamiento no uniforme en algunos productos (Brennan *et al.*, 1990) e incluso la carbonización (Maskan, 2001). Zhang *et al.* (2010) realizaron una revisión bibliográfica de la aplicación de microondas en el secado de frutas y verduras concluyendo que es una oportunidad única en el desarrollo de tecnologías avanzadas, principalmente por la reducción del tiempo de secado y la calidad de los productos obtenidos.

El empleo de microondas en el secado de uchuva y mora disminuye el tiempo de proceso, aumentando la calidad y la vida útil de los productos, y la combinación de microondas (bajos niveles de potencia) y secado convectivo, es más eficiente que el secado convectivo ya que las frutas requieren de menor tiempo para alcanzar el equilibrio (Duque *et al.*, 2011), a similares conclusiones llega Alibas (2007) para el

secado de rodajas de calabaza. El proceso combinado de deshidratación osmótica (DO) y secado con energía de microondas (DO+MW) preserva mejor la estructura celular que con la aplicación de MW únicamente (Erle *et al.*, 2001).

El ananá es una fruta que contiene aproximadamente 90% de agua, por ello los métodos de conservación basados en la reducción del contenido de agua son ampliamente empleados. Botha *et al.* (2012a) mencionan que la potencia de microondas y la temperatura del aire son los factores que más influyeron en la calidad del ananá pretratado osmóticamente y secado con energía de microondas a potencia de emisión constante.

El modelo empírico de Page deriva de una relación directa entre la humedad promedio del sólido y el tiempo de secado, además de estar fuertemente relacionados con el modelo difusional de la segunda ley de Fick (Akpınar, 2005). A pesar de que las constantes  $k$  y  $n$  de este modelo no tienen significado físico claramente definido, esta ecuación permite describir en forma satisfactoria la curva de secado de alimentos, tal como lo reportan varios autores, Simal *et al.* (2005) en kiwi, Ceylan *et al.* (2007) en banana, kiwi y palta, Doymaz (2007) en tomates, entre otros productos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación de pulsos o intervalos de aplicación de energía de microondas sobre el secado convectivo de frutas de ananá fresco y previamente tratado en solución osmótica, para establecer la condición de secado más favorable en términos de cinética de pérdida de agua, variando la relación tiempo de aplicación aire caliente/tiempo de energía de microondas.

## 2. Metodología

### **Muestra**

Se trabajó con frutas maduras de *Ananá Comosus* variedad Cayena Lisa ( $12 \pm 1$  °Brix). Las frutas se pelaron y cortaron en medias rodajas de  $0,60 \pm 0,05$  cm de espesor, con un sacabocado se retiró el centro. Se utilizó la parte media de la fruta para minimizar errores debidos a la variación del contenido de compuestos entre la base y la parte superior del ananá (Ramallo y Mascheroni, 2004).

Se evaluó la humedad de la fruta fresca y al final del secado mediante el método gravimétrico, en estufa a 75°C hasta pesada constante (aproximadamente 48 horas).

### **Secado**

Se llevó a cabo en secadero con flujo de aire axial a las muestras (Dalvo Instrumentos, modelo S343, Argentina) a temperatura (60°C) y velocidad de aire (1 m/s) constantes, durante cuatro horas. Las muestras de ananá se colocaron en bandejas plásticas evitando el contacto entre ellas.

Los pulsos de microondas se aplicaron con la potencia máxima de salida del equipo (Whirlpool, modelo WMD20SB, Argentina) de 800 W y 2450 MHz, durante intervalos de 10 y 20 segundos (amplitud del pulso). La frecuencia de la aplicación del pulso de energía de microondas se definió como la inversa del tiempo entre dos repeticiones (período), de acuerdo a la Ec. 1. Se aplicaron períodos de 30 y 60 min.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

El proceso de deshidratación osmótica (DO) se realizó en solución de sacarosa de 50°Brix, a 40°C con agitación en shaker termostatzado (Dubnoff, Argentina), durante cinco horas. Retiradas las muestras de la solución osmótica, se las enjuagó con agua

desmineralizada y el exceso de agua superficial se eliminó con papel tissue. Se registró el peso de cada muestra antes de y al finalizar el proceso de DO.

Se diseñaron procesos de deshidratación al ananá aplicando diferentes relaciones de intervalo microondas - intervalo convección forzada:

- **E1: SAC.** Secado continuo, durante cuatro horas.
- **E2: SAC30+MW10.** 30 min de flujo de aire a 60°C +10 s de energía de microondas, de modo iterativo durante cuatro horas.
- **E3: SAC60+MW10.** 60 min de flujo de aire a 60°C + 10 s de energía de microondas, de modo iterativo durante cuatro horas.
- **E4: SAC30+MW20.** 30 min de flujo de aire a 60°C + 20 s de energía de microondas, de modo iterativo durante cuatro horas.
- **E5: SAC60+MW20.** 60 min de flujo de aire a 60°C + 20 s de energía de microondas, de modo iterativo durante cuatro horas.
- **E6: SAC+MW20/2.** 20 s de energía de microondas a las 3 horas y 3,5 horas de secado con flujo de aire a 60°C.
- **E7: DO+SAC.** 5 h de deshidratación osmótica + 4 h de secado continuo.
- **E8: DO+SAC30+MW20.** 5 h de DO y luego secado combinando 30 min de flujo de aire a 60°C + 20 s de energía de MW, de modo iterativo durante 4 h.
- **E9: DO+SAC60+MW20.** 5 h de DO y luego secado combinando 60 min de flujo de aire a 60°C + 20 s de energía de microondas, de modo iterativo por 4 h.

Los ensayos se realizaron por triplicado.

### ***Cinética de secado***

Para describir la transferencia de masa durante los procesos de secado se utilizó un modelo empírico: Ecuación de Page (Ec. 2).

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

Donde:  $M_0$ ,  $M$  y  $M_e$  son los valores de humedad inicial ( $t=0$ ), al tiempo  $t$  de secado y al equilibrio, respectivamente (g de agua/100 g de materia seca);  $t$  es el tiempo de secado (min);  $k$  ( $s^{-1}$ ) y  $n$  son coeficientes de la Ec. de Page. En este trabajo asumimos que se alcanza el equilibrio en 72 h de secado, puesto que a ese tiempo se obtuvo masa constante en intervalos de 3 h.

La bondad del ajuste de la Ec. 2a los resultados experimentales se evaluó a través del coeficiente de regresión lineal ( $r^2$ ) y del error promedio porcentual (Epp) de la estimación (Ec. 3).

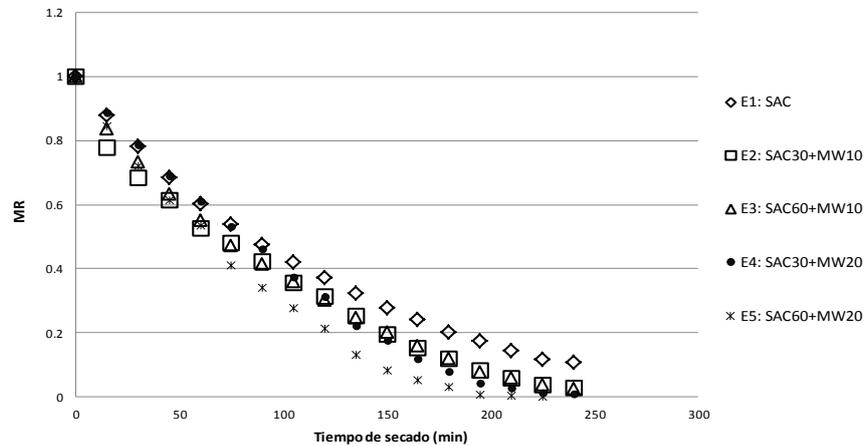
$$Epp = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{M_{exp} - M_{calc}}{M_{exp}} \right| \times 100 \quad (3)$$

### **3. Resultados**

Los resultados del contenido de agua de la fruta fresca (promedio de siete ensayos) fueron de  $8,405 \pm 1,452$  g agua/g fruta seca.

La efectividad del proceso de secado con pulsos de microondas respecto al secado continuo puede interpretarse a través de los valores experimentales de humedad de las muestras en tiempos homólogos de proceso. Estos resultados fueron representados como relación adimensional de humedad en las Figuras 1, 2 y 3. Los resultados

experimentales señalan que la aplicación de pulsos de microondas al secado con corriente de aire a 60°C favorece la velocidad de pérdida de agua, puesto que la humedad de las muestras del ensayo E1 con 4 h de secado es superior a los valores resultantes de los demás ensayos (Figura 1). A modo general, se puede observar que las curvas de secado con aplicación de pulsos de microondas se encuentran por debajo de la curva de secado continuo.

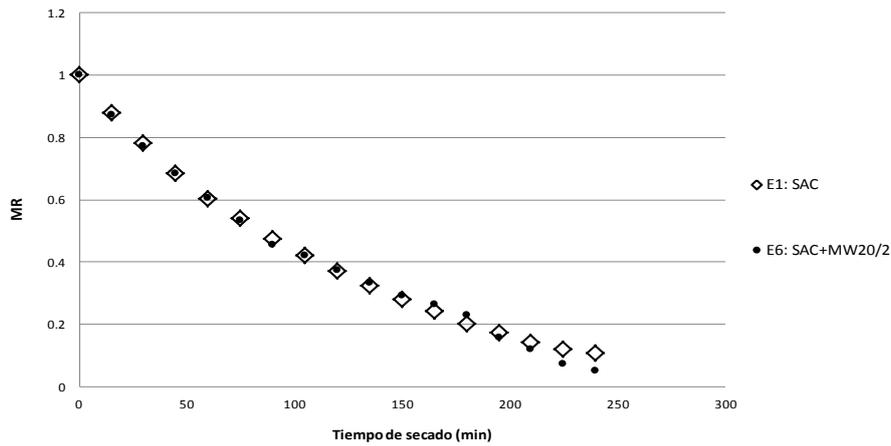


**FIGURA 1.** Variación de humedad en ananá durante el secado continuo (E1) y con aplicación de pulsos de microondas de diferente frecuencia y amplitud.

Con respecto a la frecuencia de aplicación de los pulsos de microondas ( $1/30$  o  $1/60 \text{ min}^{-1}$ ) se observó que esta variable afecta significativamente la velocidad de pérdida de agua durante el secado para los ensayos con pulsos 20 s (Fig. 1) y no afecta los resultados del secado de muestras de ananá previamente tratados con DO (Fig. 3).

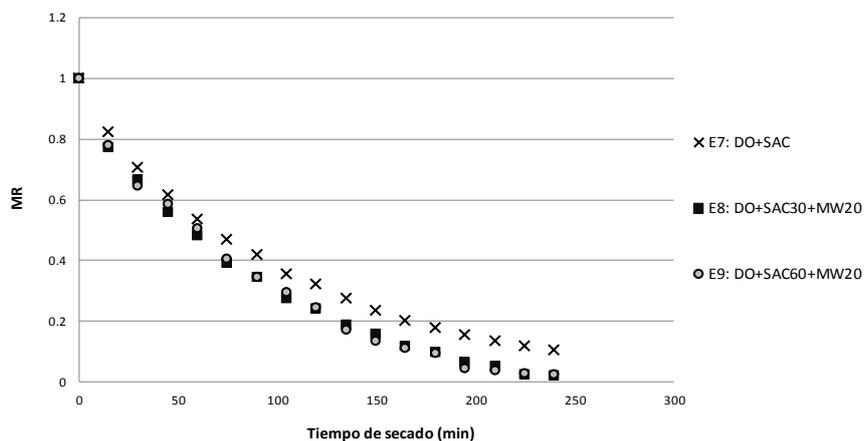
También se deduce de lo expuesto en la Fig. 1 que el tiempo de aplicación de energía de microondas o amplitud del pulso influye significativamente sobre la cinética de pérdida de agua y que este efecto es más drástico cuando la frecuencia de aplicación de los pulsos fue de  $1/60 \text{ min}^{-1}$ .

Como era predecible dado el efecto combinado de las dos variables, amplitud y frecuencia de aplicación de energía de microondas, los mejores resultados se registraron en el secado con pulsos de microondas de 20 s cada 60 minutos (E5, Fig. 1), donde a las 3 h de proceso las muestras de fruta retuvieron el 3,8% del agua inicial en tanto que en ese período las muestras de secado continuo retuvieron el 21%; asimismo el 10% del contenido de agua inicial se alcanzó en 150 y 240 minutos con secado con pulsos de microondas de 20 s cada 60 minutos y con secado continuo, respectivamente. Los resultados del ensayo E6 (Fig. 2) reafirman el efecto positivo de la aplicación de pulsos de microondas al secado convectivo sobre la cinética de secado, aún en el caso de aplicarlos en la última etapa del proceso (180 y 210 min de secado).



**FIGURA 2.** Variación de humedad en ananá durante el secado continuo (E1) y con aplicación de pulsos de microondas a los 180 y 210 min del proceso (E6).

Las muestras impregnadas previamente con sacarosa resultaron con valores de humedad más altos a igual tiempo de secado (Figura 3), posiblemente debido a que durante el proceso de deshidratación osmótica se forma una costra o capa superficial de mayor concentración de sacarosa y ello incrementa la dificultad de migración del agua desde el interior del sólido. Sin embargo, puede observarse en la Figura 3 el efecto positivo que tiene la aplicación de microondas sobre la cinética de secado de la fruta con un proceso previo de DO: la fruta alcanza el 14% del agua contenida al inicio del secado en 150 y 240 minutos de secado con pulsos de microondas de 20 s cada 60 minutos y con secado continuo respectivamente. Los resultados de Botha *et al.* (2012b) en un estudio sobre secado con aire asistido con microondas, en potencia variable, de ananá osmóticamente tratado indicaron que el uso de un apropiado programa de potencia variable de microondas combinado con bajas temperaturas del aire puede dar lugar a un proceso de secado rápido, con excelentes características del producto final.



**FIGURA 3.** Variación de humedad en ananá tratado osmóticamente, durante el secado continuo (E7) y con aplicación de pulsos de microondas de diferente frecuencia.

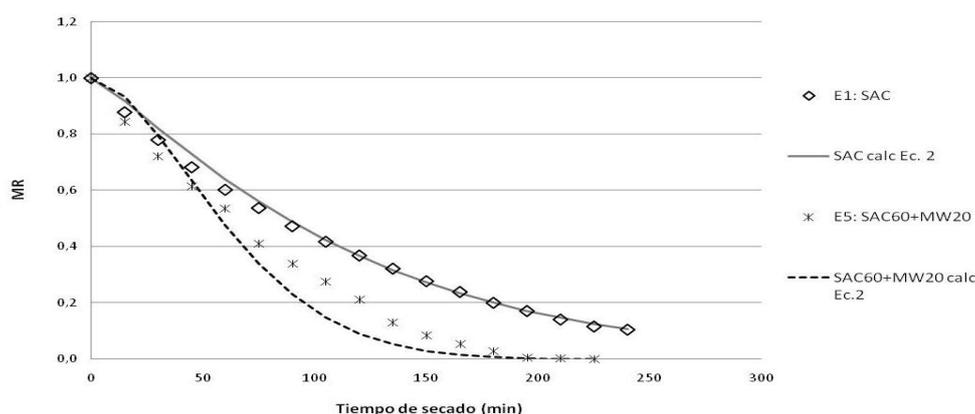
Los valores de humedad expresados como relación adimensional (MR), se ajustaron al modelo empírico de Page (Ec.2). Los valores de los parámetros resultantes del ajuste por regresión no lineal y los errores de estimación para el modelo se presentan en la Tabla 1. El parámetro  $k$  puede ser considerado como una medida de la velocidad de pérdida de humedad cuando se comparan experiencias con valores de  $n$  equivalentes.

**TABLA 1.** Constantes y ajustes del modelo de Page

Tratamiento	Modelo de Page			
	$k$	$n$	$r^2$	$E_{pp}$ (%)
<b>E1: SAC</b>	0,0034	1,18	0,9955	4,57
<b>E2: SAC30+MW10</b>	0,0047	1,2	0,9730	14,10
<b>E3: SAC60+MW10</b>	0,0048	1,2	0,9757	13,60
<b>E4: SAC30+MW20</b>	0,0004	1,7	0,9767	16,60
<b>E5: SAC60+MW20</b>	0,0007	1,7	0,9544	26,00
<b>E6: SAC+MW20/2</b>	0,0021	1,3	0,9567	12,50
<b>E7: DO+SAC</b>	0,0141	0,94	0,9986	1,79
<b>E8: DO+SAC30+MW20</b>	0,0038	1,25	0,9824	8,00
<b>E9: DO+SAC60+MW20</b>	0,0039	1,25	0,9880	7,57

Se encontró que la frecuencia de aplicación de los pulsos de MW no afecta los valores de  $k$  en los ensayos con pulsos de 10 s (E2 y E3) pero son ligeramente mayores a los valores de  $k$  del secado continuo (E1), indicando una mayor velocidad de secado para los ensayos con aplicación de energía de microondas.

En la Figura 4 se muestran los valores experimentales (símbolos) y calculados por el modelo de Page (líneas) durante el secado continuo y el secado con pulsos de microondas de 20 s cada 60 min.



**FIGURA 4.** Variación de la humedad a experimental (símbolos) y predicha por la Ec. de Page (líneas) para el secado ananá

Kassem (2011) realizaron estudios similares en la comparación del secado de uvas sin semillas empleando secado con aire caliente y microondas, concluyendo que el proceso de mayor duración fue el secado con aire caliente, luego el secado convectivo+1 pulso, y el de menor tiempo de secado fue el ensayo que aplica 1 pulso al inicio y continúa el secado convectivo. Al aplicar el modelo de Page, Kassem obtuvo resultados similares de la constante  $n$  para el secado con aire caliente, y en los métodos combinados de SAC-MW los valores fueron de 1,446 y 1,513 respectivamente, siendo semejantes a los obtenidos en este estudio en los ensayos con duración de 20s de pulso de MW. Al igual que Kassem, Bothaet al. (2012b) menciona que la aplicación de energía de microondas fue más eficaz en las primeras horas de procesamiento, pero se lentifica el secado hacia el final probablemente debido a valores muy bajos de humedad de equilibrio.

#### 4. Conclusiones

En este estudio se analizó los efectos de la aplicación de pulsos de energía de microondas durante el secado con corriente de aire a 60°C de frutas de *Ananás Comosus*. A tal fin se diseñaron ensayos de secado aplicando a distintas frecuencias pulsos de energía de microondas con diferentes valores de amplitud. Los resultados experimentales demostraron que la aplicación de energía de microondas favorece la velocidad de secado de ananá. Específicamente se observó que al disminuir la frecuencia de aplicación de microondas se conserva o incrementa la velocidad de pérdida de agua. Asimismo, los resultados señalan que en ensayos con pulsos aplicados con igual frecuencia la velocidad de pérdida de agua es mayor cuando la amplitud de pulso fue de 20 s respecto de los ensayos con pulsos de 10 s. Por otra parte, la ecuación de Page puede ser utilizada para describir satisfactoriamente la transferencia de masa durante el secado de ananá.

#### 5. Bibliografía

- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT*, 40: 1445–1451.
- Botha, G.E.; Oliveira, J.C.; Ahrné, L. (2012a). Quality optimization of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission. *Food and Bioproducts Processing*, 90: 171–179.
- Botha, G.E.; Oliveira, J.C.; Ahrné, L. (2012b). Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. *Journal of Food Engineering*, 108: 304–31.
- Ceylan, İ.; Aktas, M.; Dogan, H. (2007). Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits. *Applied Thermal Engineering*, 27: 1931–1936.
- Datta, A.K.; Anantheswaran, R.C. (2001). *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. Ed. Marcel Dekker, New York, USA, pp. 115–118.
- Doymaz, İ. (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 78: 1291–1297.
- Duque, C.A.L.; Villamizar, V.R.H. y Giraldo, P.G.A. (2011). Evaluación de las técnicas de secado de uchuva (*Physalis peruviana L.*) y mora (*Rubus glaucus*) con aire caliente y aire caliente – microondas. *Revista Tumbaga*, 6: 17-28.
- Erle, U.; Schubert, H. (2001). Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *Journal of Food Engineering*, 49: 193–199.
- Kassem, A.S.; Shokr, A.Z.; El-Mahdy, A.R.; Aboukarima A.M.; Hamed E.Y. (2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 10: 33–40.
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48: 177-182.
- Rahman, S.; Lamb, J. (1991). Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Process Engineering*, 14 (3): 163–171.
- Simal, S.; Femenia, A.; Garau, M.C.; Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66: 323–328.
- Simal, S.; Deyá, E.; Frau, M.; Rosselló, C. (1997). Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. *Journal Food Engineering*, 33: 139-150.
- Vega, A. (2003). Estudio de la deshidratación y rehidratación del pimiento rojo (*Capsicum Annuum L.*) var. Lamuyo. (Tesis Doctoral). Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España.