

TRANSFERENCIA DE CALOR Y MATERIA EN SECADO DE PRODUCTOS
BIOLOGICOS EN REGIMEN SOLAR. APLICACION AL SECADO DE PATATA.

R.M.ABALONE • M.A.LARA* y R.D.PIACENTINI*.

RESUMEN

Se presentan los resultados experimentales del secado de productos homogéneos (patata) y la modelización matemática de la transferencia simultánea de calor y materia, en condiciones externas simuladas de régimen solar.

Las experiencias y el equipo utilizados fueron descriptos en forma detallada en trabajos anteriores (ver, por ej., ref [1]). En este caso, el equipo fue acondicionado para su funcionamiento, precalentando el aire de secado con variación tipo solar (ver ec. 4).

Se obtuvieron datos de: pérdida global de masa, temperatura media de la muestra, humedad y temperatura del aire de secado. Se reguló la temperatura del medio ambiente, dentro del rango típico de variación, en la zona de clima templado-cálido y humedad considerada (Pampa Humeda Argentina).

El proceso de transferencia simultánea de masa y energía en medios porosos se describe mediante las ecuaciones desarrolladas por Luikov, las que tienen en cuenta la variación de la temperatura y el contenido de humedad en forma acoplada.

La comparación entre las mediciones realizadas y los resultados obtenidos, da un buen acuerdo en los distintos rangos de secado. El presente estudio permite, además, la identificación de parámetros característicos del producto.

INTRODUCCION

El secado es una de las técnicas más empleadas para la conservación de productos biológicos de alto contenido de humedad. El empleo de energía solar, para calentar el aire de secado y reducir consecuentemente su humedad relativa es particularmente apropiado, dado que el valor máximo de la temperatura del aire, luego de pasar a través de los colectores solares, en zonas de clima templado-cálido, no supera usualmente, los 60-70 C.

El análisis de los procesos físicos puede realizarse mediante modelos puramente difusivos o de transferencia de calor y masa acoplados. Los primeros han sido ampliamente empleados, pero describen el proceso en forma limitada, concentrándose solamente en la disminución del contenido de agua, sin dar información sobre la evolución de la temperatura interior. Los mo-

*Grupo de Energía Solar, IFIR (CONICET - U.N.Rosario)
Pellegrini 250, 2000 Rosario.

delos acoplados [2] describen en forma más detallada los procesos de secado y por lo tanto permiten obtener mayor información.

Este trabajo es continuación de los desarrollados por el Grupo de Energía Solar (IFIR) y por otros autores [3-6], en relación con el secado de productos biológicos de alto contenido de humedad y en condiciones de temperatura del aire ingresante constante o variable, simulando en este último caso, un secado solar.

EXPERIMENTACION

Se realizaron experimentos de laboratorio de secado de papata con condiciones de temperatura del aire de secado controladas. Se utilizó el equipo esquematizado en la fig. 1. La cámara de ensayo ha sido detallada en un trabajo anterior [1]. El tunel permite controlar las condiciones del aire de secado para simular un regimen solar.

Las patatas se seleccionaron de una misma variedad y se pelaron mecánicamente, dándoles forma esférica. Se empleó una de ellas para sensar la pérdida global de agua en forma automática, mediante un captor de desplazamiento LVDT y otra para sensar la evolución de la temperatura en función del radio mediante 5 termocuplas, cuyos valores se promedian.

La salida del LVDT, las termocuplas y demás sensores fueron conectadas a un equipo de adquisición de datos (FLUKE 2285) en línea con una PC, recibiendo datos y controlando el experimento a tiempo real.

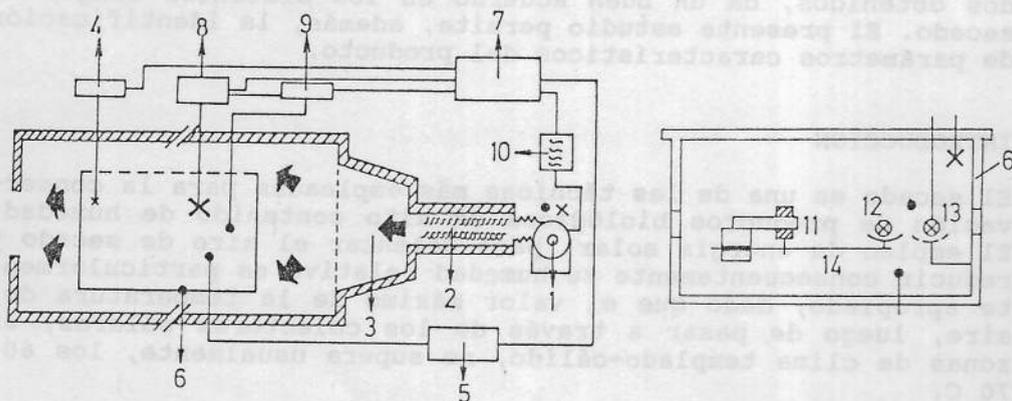


FIG.1: Equipo utilizado: 1. Ventilador centrífugo, 2. resist. calefactoras, 3. cámara de homogeneización, 4. anemómetro, 5. controlador automático de temp. y simulador de ciclo solar, 6. cámara de secado, 7. estabilizador de tensión, 8. termo-higrómetro, 9. sist. adquisición de datos, 10. regulador de vel., 11. LVDT, 12 y 13. muestras, 14. pluma del LVDT. Los símbolos • y x muestran la posición de los sensores de humedad y temperatura respectivamente.

El proceso de transferencia simultánea de masa y energía en medios porosos puede describirse mediante las ecuaciones desarrolladas por Luikov [2], que tienen en cuenta la variación simultánea de la temperatura y el contenido de humedad en forma acoplada.

Admitiendo que la temperatura ϑ y el contenido de humedad W son funciones parabólicas del radio r del producto de forma esférica, las ecuaciones diferenciales en función de los valores medios de W y ϑ resultan, para radio variable [4]:

$$\frac{d}{dt}(\bar{W}(t)) = \frac{-3 \alpha_m}{R(t) \rho_s} \Delta p + A(t) \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\bar{\vartheta}(t)) = \frac{15 a}{R(t)} & \left(\frac{\alpha (\bar{\vartheta}_A - \bar{\vartheta})}{5\lambda + \alpha R(t)} - \alpha_m L \Delta p \left(\frac{1 - \varepsilon}{5\lambda + \alpha R(t)} + \frac{\varepsilon}{5a C \rho_s} \right) \right) + \\ & + 3 B(t) \frac{dR(t)}{dt} \end{aligned} \quad (1.b)$$

donde:

$$A(t) = - \frac{3}{5} \frac{\alpha_m \Delta p}{a_m \rho_s} \quad B(t) = \frac{\alpha (\bar{\vartheta}_A - \bar{\vartheta}) - \alpha L (1-\varepsilon) \Delta p}{5\lambda + \alpha R(t)}$$

$$R(t) = \left(\frac{3 m_s}{4\pi \rho_s} \left(1 + \frac{\rho_s}{\rho_1} \bar{W} \right) \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\Delta p = d_w(\bar{W}_s) F(\bar{\vartheta}_s) - f(\bar{\vartheta}_A) \quad f(\bar{\vartheta}_A) = H_r F(\bar{\vartheta}_A)$$

con las siguientes condiciones iniciales:

$$\bar{W}(t=0) = \bar{W}_1 \quad y \quad \bar{\vartheta}(t=0) = \bar{\vartheta}_1 \quad (3)$$

Las Ecs. (1.a) y (1.b) constituyen un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales acopladas. Su solución puede obtenerse de varias maneras, previo conocimiento de los parámetros y funciones que intervienen, los que en su mayor parte fueron extraídos de la bibliografía correspondiente o propuestos, como la temperatura y humedad relativa del aire de secado. Se utilizaron, además, los parámetros obtenidos en trabajos previos.

El sistema de ecuaciones diferenciales acopladas planteado, fue resuelto mediante la técnica propuesta por Burlish-Stoer, que utiliza la extrapolación de Richardson.

Las figuras 2 y 4 muestran la variación en función del tiempo de la temperatura y de la humedad relativa del aire de secado de dos experimentos realizados (Exp. I y II). Se representan, además las funciones propuestas para la simulación. La humedad relativa del aire se calculó a partir de la temperatura y de las condiciones iniciales del aire en la cámara. Se simuló la variación diurna, empleando la misma relación que en un trabajo anterior [3]:

$$\vartheta_A = \vartheta_{A0} + \Delta\vartheta_A \text{ sen}(\pi t/q)$$

donde ϑ_{A0} es la temperatura media diaria, $\Delta\vartheta_A$ es el salto térmico y q el período considerado. Durante la noche, se considera el valor promedio de la suave variación temporal registrada.

PARAMETROS Y FUNCIONES REQUERIDAS

Contenido de humedad inicial del producto:

Exp I: $\bar{W}_1 = 6.3$

Exp II: $\bar{W}_1 = 4.1$

Temperatura inicial del producto:

Exp I: $\bar{\vartheta}_1 = 24 \text{ C.}$

Exp II: $\bar{\vartheta}_1 = 24 \text{ C.}$

Temperatura del aire de secado:

$$\vartheta_A = \vartheta_{A0} + \Delta\vartheta_A \text{ sen}(\pi t/q)$$

Exp. I: $\vartheta_{A0} = 24 \text{ C}$

$\Delta\vartheta_A = 32$

$q = 13$

Exp. II: $\vartheta_{A0} = 24 \text{ C}$

$\Delta\vartheta_A = 20.5 \text{ C}$

$q = 14$

Humedad relativa del aire de secado:

$$H_r F(\bar{\vartheta}_A) = \left(H_r F(\bar{\vartheta}_A) \right)_{t=0}$$

Exp. I: $H_r(t=0) = 0.29$

Exp. II: $H_r(t=0) = 0.45$

Calor latente de vaporización del agua: $L = 2.26 \cdot 10^6 \text{ J/Kg.}$

Difusividad termica del solido: $a = \lambda / C.\rho$

Temperatura de la superficie [3]: $\vartheta_s = (\bar{\vartheta} + \bar{\vartheta}_A) / 2 .$

Coefficiente de vinculacion: $\epsilon = 1 - \frac{1}{e^{0.5(t-16)} + 1}$

Actividad del agua: De acuerdo a las curvas de sorción típicas para patatas, para el rango de contenidos de agua considerados en el presente trabajo puede aproximarse, con error menor al 5% a:

$$d_w = 1$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección: se propone la siguiente variación funcional:

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha \text{ sen}(\pi t/q)$$

Exp. I: $\alpha_0 = 35$

$\Delta\alpha = 25$

$q = 13$

Exp. II: $\alpha_0 = 35$

$\Delta\alpha = 5$

$q = 14$

Coefficiente de transferencia de masa-aire [4]: se propone la siguiente dependencia con el contenido de humedad: $\alpha_m = \beta W^\gamma$

$\beta = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{hPa}$ $\gamma = 1.5.$

Conductividad del sólido [7]: Se consideró constante e igual a 1980 J/hmC.

Calor específico del sólido [7]: Se consideró constante e igual a 3362 J/kgC.

Difusividad másica: Ecuación de tipo Arrhenius:

$$a_m = A \exp \left(- E_a / R_0 T_A \right)$$

donde $A = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{h}$ es una constante, $E_a = 50 \text{ KJ/mol}$ es la energía de activación para la transferencia de masa, $R = 8.3 \text{ KJ/mol K}$ es la constante universal de los gases y T_A es la temperatura absoluta del aire de secado.

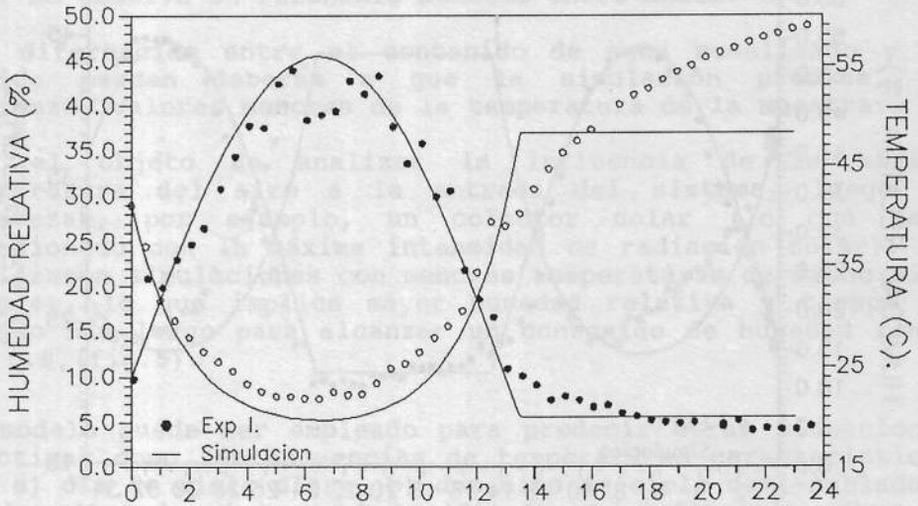


FIG.2: Temperatura y humedad relativa, medidas y simuladas para el aire de secado, exp. I.

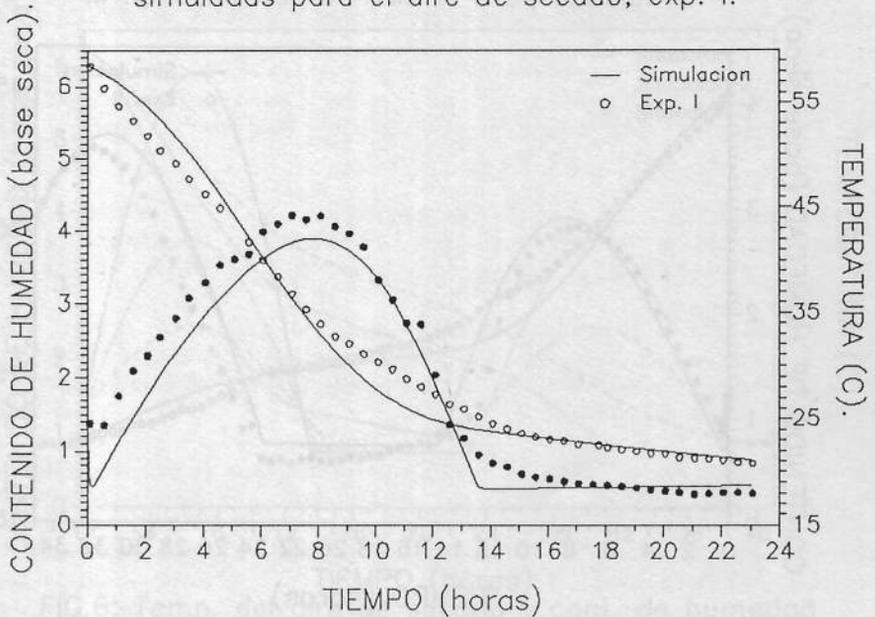


FIG.3: Valores simulados y medidos para la muestra en el experimento I.

Densidad del solido humedo [7]: Se consideró la siguiente variación funcional

$$\rho = \left(\rho_s^{-1} + Y \left(\rho_1^{-1} - \rho_s^{-1} \right) \right)^{-1}$$

donde $\rho_s = 1350 \text{ Kg/m}^3$ y Y es el contenido de humedad en base humeda.

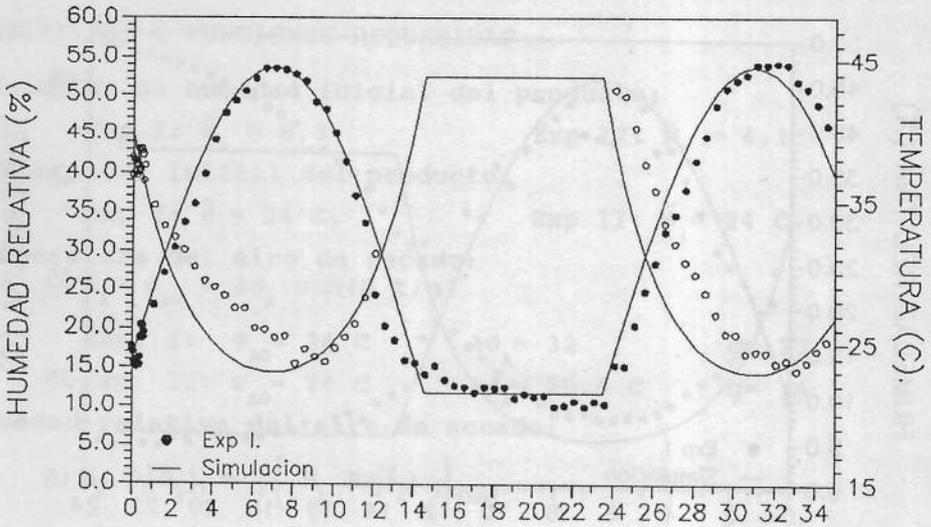


FIG.4: Temperatura y humedad relativa, medidas y simuladas para el aire de secado, exp. II.

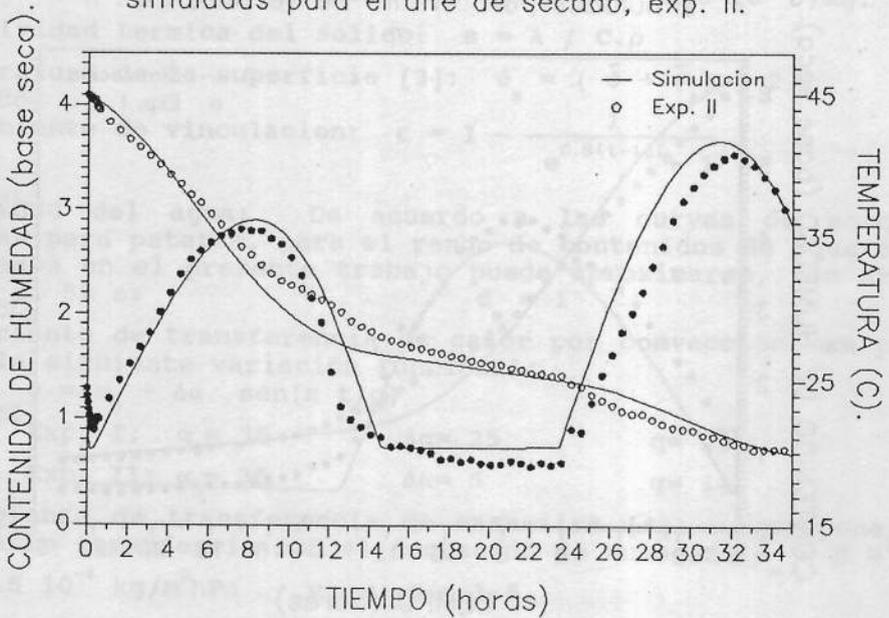


FIG.5: Valores simulados y medidos para la muestra en el experimento II.

ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la figura 2 se presentan los resultados experimentales y las funciones de ajuste propuestas para la temperatura y humedad relativa del aire de secado típicas de un proceso solar. En la fig.3 se comparan los datos de la temperatura y contenido de humedad del producto secado (patata) medidos, con los obtenidos como solución de las ecuaciones diferenciales (1). Se observa un razonable acuerdo entre ambos.

Las diferencias entre el contenido de agua modelizado y el medido pueden deberse a que la simulación predice, al comienzo, valores menores de la temperatura de la muestra.

Con el objeto de analizar la influencia de la máxima temperatura del aire a la entrada del sistema, luego de atravesar, por ejemplo, un colector solar (lo que esta relacionado con la máxima intensidad de radiación solar), se realizaron simulaciones con menores temperaturas de dicho aire (fig.4), lo que implica mayor humedad relativa y tiempo de secado más largo para alcanzar un contenido de humedad final $W_f = 0.8$, (fig.5).

El modelo puede ser empleado para predecir otras situaciones prácticas como las secuencias de temperaturas características de: a) día de cielo claro, b) dos días de cielo semi-nublado y c) dos días de cielo nublado (fig.6). Su influencia sobre la evolución temporal (velocidad de secado) y el tiempo final de secado queda evidenciada en la fig.6.

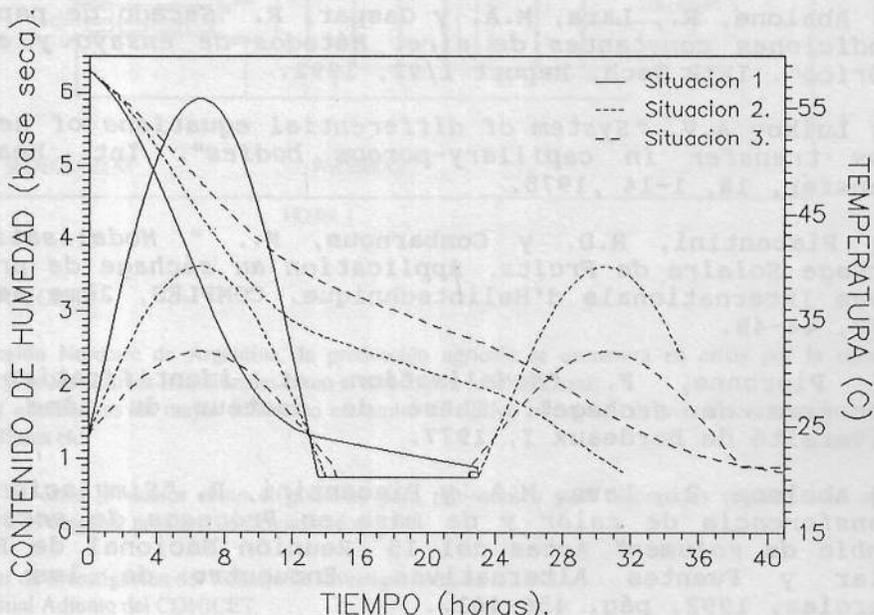


FIG.6: Temp. del aire de secado y cont. de humedad del producto, para las tres situaciones diferentes
Sit.1: Día clara. Sit.2: Dos días seminublados.
Sit.3: Dos días nublados.

En conclusión, tanto el equipo de secado desarrollado como el modelo de transferencia simultánea de calor y materia empleado, permiten obtener datos significativos de la deshidratación de productos biológicos en régimen variable (solar) y parámetros y funciones características de los mismos.

Se extenderán estas investigaciones a otros productos de menor contenido de humedad inicial (soja, etc.).

NOMENCLATURA:

a_m : difusividad térmica (m^2/s).	a : difusividad másica (m^2/s).
δ : coef. de termomigración.	C : calor esp. sól. (J/KgC).
L : calor lat. vap. (J/Kg).	H_r : humedad rel. del aire.
λ : cond. térm. sól. (W/mC).	d_w : actividad del agua.
F : presión vapor sat. (Pa).	$\bar{\vartheta}_A$: temp. media del aire (C).
$\bar{\vartheta}_s, \bar{\vartheta}_1$: temp. sup. e inic. (C).	\bar{W}_s, \bar{W}_1 : humedades sup. e inic.
Δp : dif. de presión (Pa).	$f(\bar{\vartheta}_A)$: pres. parc. a $\bar{\vartheta}_A$ (Pa).
ρ_s, ρ_1 : dens. sól. y agua (Kg/m^3).	ε : coef. de vinculación.
α_m : coef. transf. masa (W/m^2C).	α : coef. transf. calor (W/m^2C).
q : período (h).	

REFERENCIAS

- [1] Abalone, R., Lara, M.A. y Gaspar, R. "Secado de papa bajo condiciones constantes de aire. Métodos de ensayo y esquema teórico". IFIR Tech. Report 1/92, 1992.
- [2] Luikov A.V. "System of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies". Int. Heat-Mass Transfer, 18, 1-14, 1975.
- [3] Piacentini, R.D. y Combarous, M.. " Modelisation du Sechage Solaire de Fruits. Application au séchage de prunes". Revue Internationale d'Helio-technique. COMPLES, 2ème semestre 1977, 44-49.
- [4] Pieronne, F. "Modelisation et identification d'un processus de sechage". Thèse de docteur du 3ème cycle, Université de Bordeaux I, 1977.
- [5] Abalone, R., Lara, M.A. y Piacentini, R. "Simulación de la Transferencia de calor y de masa en Procesos de secado con cambio de volumen" Actas del 15º Reunión Nacional de Energía Solar y Fuentes Alternativas, Encuentro de las Nuevas Energías, 1992, pág. 456-461..
- [6] Abalone, R., Lara, M.A. y Piacentini, R. "Drying of Biological Products with Significant Volume Variation." Drying Technology . An International Journal. En prensa.
- [7] Califano, A.N. y Calvelo, A. "Thermal Conductivity of Potato between 50 and 100 C". Journal of Food Science, 56, 586, 1991.