

SECADO INFRARROJO DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES DE TOMATE

A. Ruiz Celma

M. Tapia Delgado

C. Hernández García

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales
Universidad de Extremadura. Avda. Elvas s/n, 06071 Badajoz, España.*

F. Cuadros Blázquez

Departamento de Física Aplicada

Universidad de Extremadura. Avda. Elvas s/n, 06071 Badajoz, España.

F. López-Rodríguez

Departamento de Expresión Gráfica

Universidad de Extremadura. Avda. Elvas s/n, 06071 Badajoz, España.

Resumen

Se ha estudiado el comportamiento del secado infrarrojo (IR) de los residuos industriales del tomate, pieles y semillas, en un rango de temperaturas entre 100° y 160°C. Usando métodos de regresión no-lineal (método de Marquart) y análisis de regresión múltiple, se propone un modelo matemático para el secado IR de estos residuos. La media de los valores de los coeficientes de difusividad para cada temperatura se obtiene usando la segunda ley de difusión de Fick. La dependencia de la temperatura del coeficiente de difusividad efectiva puede describirse a partir de una relación tipo Arrhenius. La energía de activación para la difusión de a humedad fue de 22,23 kJ/mol.

Palabras clave: Residuos industriales de tomate, secado infrarrojo, modelo matemático.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo del tomate (*Solanum lycopersicum*) está ampliamente extendido por todo el mundo, aproximadamente el 90% de la producción mundial se concentra en el hemisferio norte (Área Mediterránea, California y China). Aunque el tomate se produce en cientos de países, los mayores productores son: Estados Unidos, China, Italia, Irán, Turquía, España, Brasil, Portugal, Grecia y Chile (FAO, 2006)

El procesado industrial del tomate da lugar a muchos productos diferentes: concentrado de tomate, zumo, salsa de tomate, tomate deshidratado, etc. Los residuos de tomate que se utilizan en este estudio son los que derivan de los procesos de transformación, y son principalmente la piel y las pepitas, que suponen entre un 3% y 5% en peso del producto seco. Estos subproductos, como la mayoría de los residuos sólidos vegetales se utilizan para alimentar al ganado, pero su elevado contenido en humedad hace que surjan problemas con su conservación y almacenamiento; por ello deben consumirse rápidamente para evitar problemas de fermentación favorecidos además, por las altas temperaturas que se registran en la época de generación de los residuos. Para evitar este problema es recomendable hacer uso del secado térmico.

Los procesos de secado habituales para los residuos industriales del tomate (RIT) son aquellos que utilizan gases calientes, la humedad se evapora y es transportada por el flujo de gas caliente. Algunos ejemplos pueden ser secaderos de tambor, de cinturón, de lecho fluidizado, etc. Sin embargo, muchas de estas tecnologías pueden ser optimizadas en términos de consumo energético, seguridad de operación, control del proceso de secado e impacto ambiental debido a las emisiones. El secado de biomasa mediante aire o gases calientes conlleva una baja eficiencia energética y un largo tiempo de secado, debido a la baja conductividad térmica de los materiales biomásicos; la transferencia de calor del producto durante el secado convencional es limitada.

Teniendo esto en cuenta se introduce en este trabajo un análisis del secado infrarrojo (IR) aplicado a RIT, buscando incremento del proceso térmico efectivo aunque se presenta el inconveniente del uso de energía eléctrica. El secado IR está basado en la acción de la radiación de longitud de onda infrarroja de una fuente que interacciona con la estructura interna de la materia, incrementando así su temperatura y favoreciendo la evaporación de su contenido de humedad. Por otra parte la energía IR es transferida desde el elemento emisor a la muestra sin calentar el aire circundante. Así en el proceso radiante la temperatura de las capas interiores de la muestra es más alta que la del aire que la rodea. Como resultado, el secado de la muestra tiene lugar desde las capas interiores hacia las exteriores mediante fenómenos térmicos de convección y radiación. Esto conlleva un alto grado de calor transferido con respecto al secado convencional. La técnica del secado IR es particularmente válida para productos con significativos contenidos de humedad, para los que la radiación de onda larga (por encima de 3 μm) es absorbida casi en su totalidad por la humedad, mientras el material seco es altamente permeable a dicha radiación. El calentamiento por IR presenta algunas ventajas con respecto al secado convencional, tales como la disminución del tiempo de secado, una mayor eficiencia energética y un menor flujo de aire para atravesar la muestra.

El secado IR se ha estudiado como un método potencial de secado para numerosos productos como son frutas, vegetales y grano, así como productos derivados como se describe en los trabajos sobre zanahoria (Toğrul, 2006), patata (Afzal & Abe, 1998), cebolla (Sharma, Verma & Pathare, 2005) y orujos húmedos (R. Celma, Rojas & López, 2008). En todos los estudios el periodo de velocidad decreciente es la variable más relevante y se usa la segunda ley de la difusión de Fick's para describir el proceso de secado. Concretamente, los modelos empíricos y semiteóricos, que consideran sólo la

resistencia externa a la transferencia de humedad entre el producto y el aire son los más usados.

El objetivo de este trabajo es investigar el secado IR de los RIT en capas finas para lograr una estimación precisa de las constantes de las ecuaciones del modelo seleccionadas para describir el proceso, de los coeficientes de difusión y de la energía de activación. El efecto de la temperatura en estas constantes y coeficientes también se analiza.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las muestras de RIT fueron obtenidas de una industria tomatera local situada en la provincia de Badajoz. Los RIT muestran un contenido inicial de humedad ($236.70 \pm 0.5\%$) en peso y en base seca.

Las muestras fueron distribuidas uniformemente en la bandeja del analizador de humedad (Figura 1) a modo de capa fina. La masa de la muestra se mantuvo constante para cada experimento, aproximadamente 20,61 g, con un grosor de 0.70 cm. La temperatura de secado fue programada a 100, 120, 140 y 160 °C para cada experimento. La pérdida de humedad fue registrada a intervalos de 30 s durante el proceso de secado para determinar las curvas de secado. El contenido de humedad fue calculado usando la ecuación: $M = ((W_0 - W) - W_1) / W_1$, donde M es el contenido de humedad (g agua/ g materia seca), W_0 es el peso inicial de la muestra (g), W es la cantidad de humedad evaporada (g) y W_1 es el contenido de materia seca de la muestra (g).



Figura 1. Analizador de humedad

Los valores del contenido de humedad obtenidos fueron convertidos al ratio de humedad, MR usando la siguiente ecuación (Midilli, 2001): $MR = (M_t - M_e) / (M_0 - M_e)$. Sin embargo, se simplificó a $MR = M_t / M_0$, donde M_t y M_0 es el contenido de humedad para cualquier tiempo dado y el contenido inicial de humedad respectivamente.

El coeficiente de determinación (r^2), la chi-cuadrado reducida (χ^2), error cuadrático medio (RMSE), y suma de los residuales fueron calculados para evaluar el ajuste de cada modelo a los datos experimentales. Los valores más altos del coeficiente de determinación (r^2) y los valores más bajos de la chi-cuadrado reducida (χ^2), RMSE y la suma de los residuos fueron elegidos por la bondad del ajuste (Midilli & Kucuk, 2003; Akpinar, Bicer & Cetinkaya, 2006). Estos parámetros pueden ser calculados como:

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - p} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$residuales = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i}) \quad (3)$$

donde $MR_{exp,i}$ es el ratio de humedad experimental, $MR_{pre,i}$ el ratio de humedad predicho, N el número de datos y p el número de constantes en el modelo de regresión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cambios en el ratio de humedad con el tiempo durante el secado infrarrojo de los RIT se muestran en la Figura 2. En ella se puede observar que (i) el ratio de humedad decrece exponencialmente con el tiempo de secado y (ii) se ha visto que todos los procesos suceden en el periodo de velocidad de secado decreciente. El mismo contenido de humedad (aproximadamente $M = 0$) puede obtenerse en diferentes tiempos de secado por cada temperatura de secado. Como se esperó, el tiempo de secado total mostró una reducción sustancial con los incrementos de temperatura. Para cuatro valores diferentes de temperatura (100, 120, 140 y 160 °C), los valores de tiempo de secado fueron 99.5, 55, 44 y 35 min, respectivamente, con un contenido final de humedad de 5.26% en peso y en base seca.

La velocidad de secado, DR, expresa la cantidad de humedad evaporada con el tiempo (g agua/ g materia seca). Los ratios de secado de los RIT fueron calculados como $DR = (Mt + \Delta t - Mt) / \Delta t$.

La Figura 3 muestra las variaciones del rango de secado con el contenido de humedad de las muestras de los RIT húmedo a temperaturas de secado de 100, 120, 140 y 160°C. Se advierte que el rango de secado decrece a medida que disminuye el contenido de humedad. Después del periodo inicial de calentamiento de la muestra, el rango de secado alcanza su valor máximo y, poco después, el producto se seca solo en el periodo de velocidad de secado decreciente. Los valores iniciales del rango de secado son siempre mayores cuando trabajando con los valores más altos de temperatura. La evaporación del agua inicialmente tiene lugar en la superficie de los RIT, pero ésta pierde relevancia con el tiempo de secado. El proceso de difusión de la humedad progresivamente llega a ser un factor significativo.

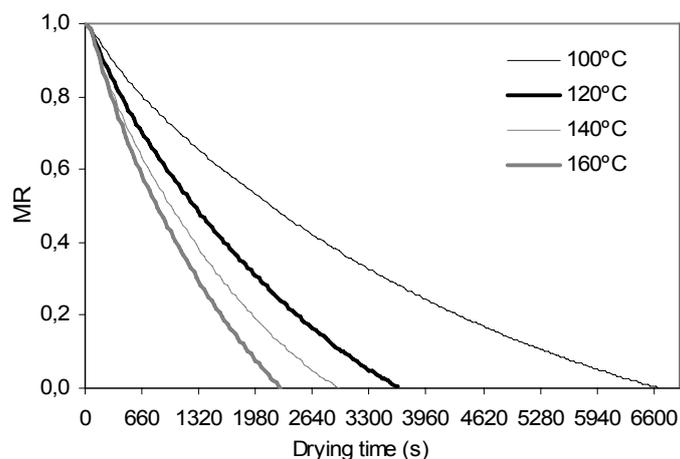


Figura 2. Curvas de secado de los RIT a diferentes temperaturas.

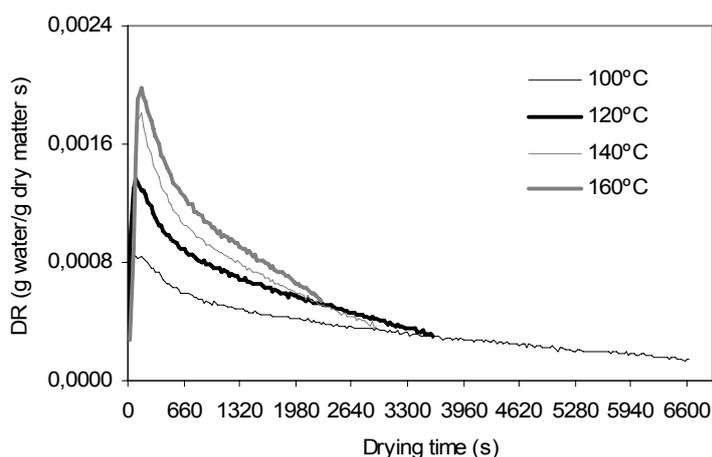


Figura 3. Velocidad de secado frente al contenido de humedad de los RIT a diferentes temperaturas.

En la Tabla 1 se recogen algunos de los modelos de secado de vegetales, frutas y productos agroderivados, con sus respectivas ecuaciones matemáticas; siendo a, b y c constantes empíricas, k la constante del ratio de secado, y t el tiempo de secado. En la Tabla 2 se muestran los valores de los coeficientes utilizados para el ensayo de algunos de los modelos estudiados, siendo n un número entero positivo e y una constante empírica. Se utilizaron técnicas de regresión no lineal para obtener las diferentes constantes en cada modelo seleccionado.

En este trabajo se analiza un amplio conjunto de curvas de secado en capa fina para describir las curvas de secado a diferentes temperaturas. Se concluye que el modelo de Midilli (con valores de r^2 sobre 0.9997 teniendo en cuenta todo el rango de temperaturas, los valores de χ^2 entre 5.3309×10^{-6} y 2.0747×10^{-5} y RMSE entre 0.00251 y 0.00443. Los residuales de este modelo varían desde -0.00001 y 0.00028.

Nº	Modelo	Expresión analítica
1	Modificado de Page-I	$MR = \exp(-(kt)^n)$
2	Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$
3	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
4	Aproximación de la difusión	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
5	Difusión de Fick simplificado	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$

Tabla 1. Algunos modelos de secado y sus respectivas expresiones.

Nº	Tª	Constantes de los modelos	r ²	χ ²	RMSE	Suma de los residuales
1	100°C	k=0.00035319, y=1.1932981	0.9915	6.6146 x 10 ⁻⁴	0.02560	-1.45299
	120°C	k=0.00060806, y=1.2528442	0.9916	6.9148 x 10 ⁻⁴	0.02607	-0.76401
	140°C	k=0.00077419, y=1.2518549	0.9926	6.2489 x 10 ⁻⁴	0.02474	-0.56053
	160°C	k=0.00093120, y=1.3231262	0.9923	6.7816 x 10 ⁻⁴	0.02570	-0.41674
2	100°C	a=1.2607776, c=-0.2770623, k=0.00022511	0.9997	2.0768 x 10 ⁻⁵	0.00452	-0.00000
	120°C	a=1.3624521, c=-0.3656689, k=0.00035805	0.9997	1.7889 x 10 ⁻⁵	0.00417	0.00000
	140°C	a=1.3111636, c=-0.3053866, k=0.00049266	0.9997	2.5134 x 10 ⁻⁵	0.00493	0.00000
	160°C	a=1.4493959, c=-0.4322513, k=0.00052743	0.9996	2.7047 x 10 ⁻⁵	0.00509	0.00000
3	100°C	a=1.0033400, b=-0.000028988, n=0.9282856, k=0.0004704	0.9999	5.3309 x 10 ⁻⁶	0.00228	-0.00097
	120°C	a=1.0116795, b=-0.000061340, n=0.9420742, k=0.0006723	0.9999	6.5179 x 10 ⁻⁶	0.00251	-0.00020
	140°C	a=1.0192737, b=-0.000066536, n=0.9530249, k=0.0008269	0.9998	1.3663 x 10 ⁻⁵	0.00362	-0.00001
	160°C	a=1.0236663, b=-0.000099754, n=0.9821009, k=0.0007600	0.9997	2.0747 x 10 ⁻⁵	0.00443	0.00028
4	100°C	a=1.66911864, b=0.3522094, k=0.00020564	0.9993	5.4378 x 10 ⁻⁵	0.00732	-0.44741
	120°C	a=6.65180657, b=0.8151380, k=0.00023787	0.9996	2.6673 x 10 ⁻⁵	0.00510	-0.06490
	140°C	a=3.24554663, b=0.6433201, k=0.00034763	0.9996	3.3330 x 10 ⁻⁵	0.00568	0.00649

	160°C	$a=7.18767011,$ $b=0.7892166, k=0.00031108$	0.9993	5.4579×10^{-5}	0.00724	0.10985
5	100°C	$a=1.04852691,$ $c=0.000000018521$	0.9835	1.2890×10^{-3}	0.03574	-1.58553
	120°C	$a=1.06746903,$ $c=0.000000032480$	0.9803	1.6206×10^{-3}	0.03992	-0.90593
	140°C	$a=1.07273987,$ $c=0.000000041641$	0.9822	1.4992×10^{-3}	0.03832	-0.75210
	160°C	$a=1.09192729,$ $c=0.000000050903$	0.9777	1.9659×10^{-3}	0.04375	-0.61460

Tabla 2. Coeficientes de los modelos de secado anteriores.

El procedimiento de ajuste indica que los resultados obtenidos mediante la expresión de Midilli pueden usarse para establecer un modelo del comportamiento de secado infrarrojo de los RIT, pero éste no reproduce la influencia de la temperatura de secado. Mediante técnicas de regresión múltiple se ha hecho una regresión de los valores de las constantes y los coeficientes del modelo de Midilli. La múltiple combinación de los parámetros que dieron el valor más alto de r^2 fue incluido en el modelo seleccionado.

Basado en análisis de regresión múltiple, se propone la siguiente ecuación para evaluar el ratio de humedad de los RIT para el tiempo de secado y las temperaturas de secado consideradas en los experimentos

$$MR = (1.05811 - 5.50042T^{-1}) \exp((0.00137 - 0.08708T^{-1})r^{(1.17612 - 0.00095821T)^{-1}}) + (0.000077216 - 0.0000010874T)r \quad (4)$$

Este modelo muestra con bastante precisión la estimación del ratio de humedad para los RIT para cualquier tiempo durante el proceso de secado, para todo el rango de temperaturas considerado. En el afán de buscar una única expresión para el rango de temperatura estudiado, la inclusión de la dependencia de las variables del modelo de Midilli con la temperatura nos proporciona una buena aproximación a la cinética del proceso de secado real.

La solución analítica de dicha ecuación de difusión asumiendo una distribución inicial uniforme de humedad, con la simplificación del movimiento de la humedad por difusión, una reducción de volumen insignificante, coeficientes de difusión y temperatura constantes, puede ser expresada como (Crack, 1975):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

donde D_{eff} es la difusividad efectiva (m^2/s), L es el grosor de la muestra (m) y n es el número de términos tenidos en cuenta. Para largos periodos de secado, $MR < 0.6$, la ecuación puede simplificarse al primer término de la serie (Senadeera et al, 2003). Así tomando logaritmos naturales en ambos miembros el resultado es el siguiente:

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \quad (6)$$

El coeficiente de difusión para cada temperatura de secado se calculó sustituyendo los datos experimentales en la ecuación anterior. En la práctica, tal coeficiente se determina representando los datos experimentales en términos de $\ln(MR)$ frente al tiempo de secado. Si se representa el $\ln(MR)$ de la ecuación 6 frente al tiempo de secado obtenemos una línea con una pendiente que representa la medida de la difusividad.

La correlación entre las condiciones de secado y los valores determinados de la difusividad efectiva pueden ser expresados por una ecuación tipo Arrhenius tal como:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

donde D_0 es el factor pre-exponencial de la ecuación de Arrhenius (m^2/s), E_a es la energía de activación de la difusión de la humedad (kJ/mol), T es la temperatura absoluta del aire (K) y R es la constante de los gases ($kJ/kmol K$).

Tomando logaritmos naturales, la ecuación (7) puede ser expresada como:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (8)$$

Para obtener las magnitudes de los coeficientes de la ecuación anterior, los valores de $\ln(D_{eff})$ se representaron frente a $1/T$. La energía de activación fue calculada a partir de la pendiente de la línea recta (E_a/R), cuando la intersección es igual al $\ln(D_0)$, Figura 5. El valor final es de $21.30 kJ/mol$, donde el factor de Arrhenius D_0 es $7.254 \times 10^{-6} m^2/s$.

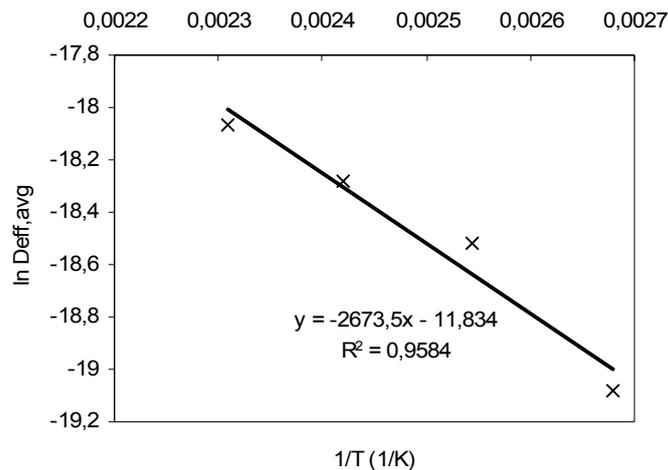


Figura 5. Relación de tipo Arrhenius relativa a la difusividad y la temperatura.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado el efecto de cuatro temperaturas de secado en los experimentos de secado por infrarrojos de los RIT. Para reproducir el comportamiento de los RIT se han estudiado trece modelos analíticos de la bibliografía considerando los coeficientes de regresión y los parámetros estadísticos χ^2 , RMSE y la suma de los residuos. En este sentido, es el modelo de Midilli el que mejor describe el cambio del ratio de humedad con la temperatura de secado utilizando temperaturas entre 100 y 160 °C. La dependencia de las constantes o coeficientes de este modelo con la temperatura se ha representado de manera precisa mediante la expresión derivada de la ecuación de Midilli, mejor que las obtenidas del resto de modelos analíticos.

Los valores de la difusividad efectiva varían entre $5.179 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $1.429 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para el rango de temperaturas desde 100 a 160 °C. La difusividad efectiva se incrementa con la temperatura. Además, la dependencia de la temperatura de los coeficientes de difusividad fue descrita por la relación de Arrhenius. Finalmente, la energía de activación para la difusión de la humedad se ha encontrado que tiene un valor de 22.23 kJ/mol.

Referencias

- Afzal, T.M. & Abe, T, 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *Journal of Food Engineering*, 37, 353-365.
- Crank J. 1975. *Mathematics of diffusions* (2nd ed.). London, Oxford University Press.
- FAO, 2006. FaoStat Database. Available from <http://faostat.fao.org>
- Midilli A. ,2001. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal Energy Research*, 25, 715-725.
- Midilli, A, Kubuk, H, Yapar, Z. (2002) A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20, 1503- 1513.
- Ruiz Celma, A., Rojas, S. & López-Rodríguez, F. ,2008. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. *Chemical Engineering and Processing, Process Intensification*, 47, 1810-1818.
- Sharma G.P., Verma, R.C., Pathare, P.B.,2005. Thin layer infrared radiation drying of onion slices. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.
- Senadeera W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B. ,2003,. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidised bed drying. *Journal of Food Engineering*, 58, 277-283.
- Toğrul, H, 2006. Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77, 610-619.

Agradecimientos

Este trabajo ha recibido soporte financiero del Proyecto "Competitividad del Sector de Semielaborados de Tomate", Subproyecto PSS-060000-2007-7, enmarcado en el Programa Nacional de Recursos y Tecnologías Agroalimentarias del Ministerio de Educación y Ciencia.

Correspondencia

Antonio Ruiz Celma
Escuela de Ingenierías Industriales
Universidad de Extremadura
Área de Máquinas y Motores Térmicos
Avda. de Elvas s/n 06071 Badajoz
Teléfono: +34 924 289 600
Fax: +34 924 289 601
E-mail: antoniorcelma@gmail.com