

SECADO DE MANZANA EN SECADERO TUNEL DE LABORATORIO Y EN SECADERO SOLAR EN CONVECCIÓN NATURAL. MODELIZACION DE LA CINETICA DE SECADO

A. Iriarte y S. Bistoni

Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET
Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca
M. Quiroga N° 93, 4700 – Catamarca, Argentina. iriarteadolfo@gmail.com

Recibido 13/08/18, aceptado 27/09/18

RESUMEN: En el presente trabajo se analiza el secado de manzana en secadero túnel de laboratorio con convección forzada y en un secadero solar en convección natural. Se describen los secaderos y la cinética de secado para ambos equipos, así como la evaluación térmica del secadero solar. En ambos casos el producto fue tratado previamente con jugo de limón y metabisulfito de sodio, estudiándose la influencia que ambos tienen sobre el producto final. Se utilizaron diez modelos matemáticos de secado para el ajuste de los datos experimentales. De acuerdo con los criterios estadísticos R^2 , χ^2 , MBE y RMSE, el modelo de Aghbashlo fue el que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado de las rodajas de manzana en ambos secaderos. El tratamiento con jugo de limón resultó con mayor velocidad de secado, mejor apariencia y menor toxicidad en los dos ensayos.

Palabras clave: cinética de secado, secado convección natural, manzana, pretratamiento

INTRODUCCIÓN

El secado es el método más antiguo para conservar alimentos y también es un método ampliamente utilizado para la conservación de frutas y verduras, que funciona eliminando el agua de los alimentos, evitando así el crecimiento de microorganismos y la descomposición. El agua se elimina hasta una concentración final que asegure la estabilidad y seguridad microbiana del producto y minimice los cambios químicos y físicos del material durante el almacenamiento. En la mayoría de los procesos de secado, el agua se elimina por evaporación por el suministro de aire caliente (Lewicki y Jakubczyk, 2004). En particular, en la región del NOA es una de las formas tradicionales de obtener productos que poseen valor regional: pasas de uvas, higos, pelones, orejones de durazno, manzana, etc. En la mayoría de los casos estos productos son elaborados por pequeños productores y sus familias; son realizados en forma artesanal, exponiéndolos directamente al sol. Debido a esto, las posibilidades de contaminación son grandes y los productos no son de óptima calidad, a la vez se producen importantes pérdidas debido a factores climáticos, como ser lluvia, viento, rocío, etc. Algunos productores, con el objeto de evitar estas pérdidas, cubren el producto con plásticos o los colocan en bandejas para poder guardarlos cuando se requiere.

El comportamiento del secado es básicamente influido por factores internos (por ejemplo, densidad, permeabilidad, porosidad, características de sorción - desorción y propiedades termo físicas) y parámetros externos (temperatura, velocidad y humedad relativa del medio de secado) (Kaya et al., 2007). Por lo tanto, es muy importante definir las condiciones bajo las cuales se pueden conservar las características de los productos frescos y definir los parámetros óptimos para su almacenamiento y reutilización (Velić et al., 2004).

Los métodos de secado influyen tanto en la calidad como en las características fisicoquímicas de los productos secos (Krokida y Maroulis, 1997), siendo la apariencia, el color y otras propiedades físicas tales como contracción y porosidad las que definen la calidad del secado. En este sentido, los tratamientos previos al secado, detienen el metabolismo del tejido cortado, ya sea dañando las células

o las conexiones enzimáticas (Lewicki, 2006). También son importantes para minimizar los cambios adversos que ocurren con el contacto del aire durante el proceso de deshidratación y su posterior almacenamiento. La eficacia del pretratamiento depende del tipo de sustancia que se use.

En el caso particular de la manzana si bien se consume en gran medida como producto fresco es importante disponer de ella en épocas distintas a la de la cosecha. Una alternativa sería almacenarla como producto deshidratado y en nuestra región, debido a los altos costos de combustible o electricidad y los altos niveles de radiación solar, el empleo de secadores solares es totalmente rentable.

Existen numerosos diseños de secaderos solares adaptables al tipo de producto y al nivel de producción. Hossain y Bala (2007) proponen un secadero túnel con convección forzada; Jairaj et al. (2009) presentan una recopilación de diferentes diseños que se han utilizado para el secado; Condorí et al. (2009) presentan un secadero indirecto a nivel industrial para el secado de hortalizas con colectores solares y cámara de secado. Para el secado de pimiento para pimentón en el NOA se han propuestos varios diseños, desde semi industriales a aptos para pequeños productores: secaderos tipo invernaderos (Bistoni et al., 2008), secadero mixtos con cubiertas de plástico (Bistoni et al., 2010), secadero industrial híbrido solar biomasa que permite la producción continua de pimiento desecado (Condorí et al., 2010).

El objetivo del presente trabajo fue determinar los parámetros que caracterizan la cinética de secado, el comportamiento de las muestras con y sin tratamientos, así como los modelos que lo representan, en un túnel de secado de laboratorio y en un secadero solar en convección natural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las manzanas fueron lavadas y cortadas en rodajas entre 4 y 5 mm de espesor y con diámetros aproximados de 7,9 cm. Las muestras fueron divididas en dos lotes y cada uno fue tratado previamente con uno de los siguientes tratamientos: a) Inmersión en una solución de metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2 \text{S}_2 \text{O}_5$) al 0,5 % durante 3 minutos y b) Inmersión en jugo de limón al 10 % durante 15 minutos. Se tomaron tres repeticiones para cada tratamiento, así como para las muestras testigos, las que no fueron sometidas a ningún pretratamiento. Las muestras se pesaron con una balanza electrónica (Mettler \pm 0,1g). El peso seco del producto se obtuvo llevando tres muestras a estufa a 102 °C hasta obtener peso constante.

Para medir la temperatura y humedad en los ensayos de secado se utilizaron Data Logger tipo HOBOS inalámbricos con sensores externos “smart sensor” que permite medir temperatura en el rango de -40°C a 75 °C (precisión de \pm 0,2 °C, resolución de 0,02 °C) y humedad relativa del aire entre 10 - 90 % (precisión de \pm 2,5 %, resolución de 0,1 %). La velocidad del aire se midió con un anemómetro de hilo caliente, marca TSI 1650 (\pm 0,05 m s⁻¹), en diferentes puntos en dirección longitudinalmente y transversalmente

Túnel de secado de laboratorio

El túnel de secado de laboratorio está formado por un tubo aislado de sección cuadrada de 0,31 m, cada lado. Es un sistema abierto sin recirculación del aire. El aire se calienta mediante seis resistencias eléctricas envainadas en cuarzo de 500 W cada una. Posee tres bandejas ubicadas al final del túnel. El aire del ambiente exterior al recinto de secado, es ingresado por succión mediante un ventilador centrífugo de ½ HP (flujo de 0,041kg s⁻¹). El aire circula en paralelo a las bandejas. En la figura 1 se muestra un esquema del túnel de secado de laboratorio: (1) Entrada de aire; (2) Ventilador centrífugo; (3) Resistencias; (4) Medidores temperatura, humedad y control de velocidad de aire; (5) Salida de aire.

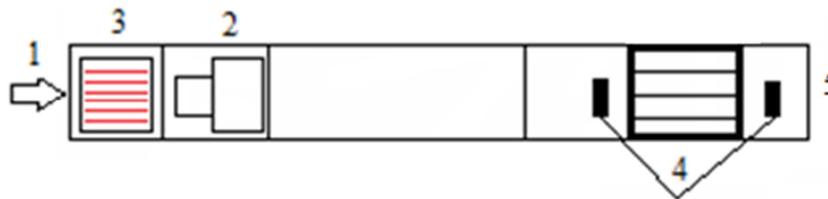


Figura 1: Esquema del secadero túnel de laboratorio

Secadero solar por convección natural

El secadero es tipo gabinete con estantes escalonados en donde se colocan las bandejas con el producto a secar. Consta de una caja con estructura de fierros con madera en los laterales y base. Sus dimensiones son 2 m de largo, por 1 m de ancho y 0,50 m de profundidad. En la base interior de la caja tiene una chapa pintada de negro para que funcione como un colector solar. El secadero está inclinado para favorecer la captación de la radiación solar, figura 2.

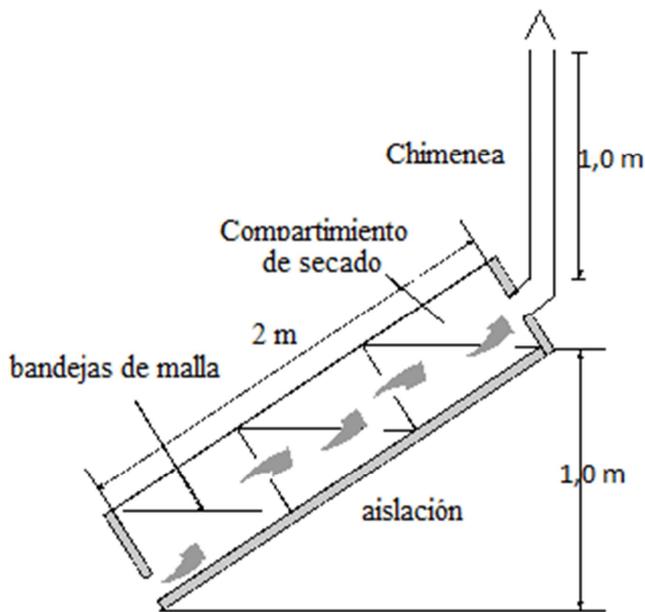


Figura 2: Esquema Secadero



Figura 3: Vista Secadero

El secadero está dividido en tres compartimentos, correspondiente a las tres bandejas que posee, figura 3. Estas partes están divididas por separadores de policarbonato, colocados en forma vertical respecto a la base del secadero. En estos separadores se han realizado tres orificios de 0,05 m de diámetro cada uno por donde circula el aire. La cubierta del secadero es de policarbonato alveolar de 6 mm de espesor y está dividida en las mismas tres partes. Cada una de estas cubiertas es rebatible sobre una de sus lados para facilitar la carga y descarga del secadero, ya que permite abrir los compartimentos independientemente sin tener que sacar toda la cubierta.

El aire ingresa al secadero por la base a través de sección de área de $0,20 \text{ m}^2$ y es obligado a circular por las bandejas a través de los agujeros que se encuentran en los separadores. Esta abertura está cubierta por tela "mosquitera" plástica. En la parte superior presenta una chimenea de 1,00 m de longitud y construida con caño de plástico de 0,10 m de diámetro. La circulación del aire es por convección natural, facilitada por la incorporación de la chimenea. Las bandejas constan de un marco de madera y malla media sombra doble (80 %) y van colocadas inclinadas respecto a la superficie horizontal, de manera tal que cuando el secadero está inclinado, las bandejas quedan horizontales.

Cinética de secado

Para determinar la cinética de secado en el túnel de laboratorio las muestras fueron pesadas cada 30 minutos hasta llegar a peso constante. En el secado solar las pesadas fueron horarias durante los días de secado.

La relación de humedad (MR) se define por la ecuación (1):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad [1]$$

donde M es el contenido de humedad instantánea; M_0 contenido de humedad inicial y M_e contenido de humedad de equilibrio. Como M_e generalmente es bajo para los productos alimenticios (Togrul y Pehlivan, 2004), se lo considera despreciable, por lo tanto, la relación de humedad (ecuación 1) se simplifica a (ecuación 2):

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad [2]$$

Para la determinación de los modelos que ajustan las curvas de secado experimentales se utilizaron las expresiones matemáticas detalladas por Sadeh Seiedlou et al. (2010). Las mismas se muestran en la tabla 1. Estos modelos fueron aplicados a los datos experimentales usando la técnica de regresión.

Nombre Modelo	Ecuación del modelo	Nombre Modelo	Ecuación del modelo
<i>Newton</i>	$MR = \exp(-k t)$	<i>Wang - Singh</i>	$MR = 1 + a t + b t^2$
<i>Page</i>	$MR = \exp(-k t^n)$	<i>Page modificado</i>	$MR = \exp[-(k t)^n]$
<i>Henderson - Pabis</i>	$MR = a \exp(-k t)$	<i>Verma et al.</i>	$MR = a \exp(-k t) + (1-a) \exp(-bt)$
<i>Logarítmico</i>	$MR = a \exp(-k t) + c$	<i>Thomson</i>	$t = a \ln(MR) + b (\ln(MR))^2$
<i>Aghbashlo</i>	$MR = \exp(-k_1 t / (1 - k_2 t))$	<i>Midilli y Kucuk</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$

Tabla 1. Modelos matemáticos para describir la cinética de secado

El análisis se realizó mediante un software estadístico para regresión no lineal. El coeficiente R^2 fue uno de los principales criterios para la selección de la mejor ecuación. Además, para determinar el mejor ajuste se utilizaron los índices estadísticos chi-cuadrado reducido (χ^2), desviación media (MBE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). El modelo seleccionado para ajustar las curvas de secado se determinó considerando el valor más alto de R^2 y los valores más bajos de χ^2 , MBE y RMSE. Por otro lado se desecharon los modelos en que las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y aquellos en que la correlación de los coeficientes estimados no fue superior a 0,80. Los índices estadísticos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad [3]$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad [4]$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i}) \quad [5]$$

donde: MR_{exp} : relación de humedad experimental; MR_{pred} : relación de humedad predicha; z: número de constantes en el modelo; N: número de datos

Determinación de la difusividad efectiva de humedad

Durante el proceso de secado, conforme el agua se evapora de la superficie del producto, ocurre la migración de agua desde el interior del sólido; cuando esta migración no es suficientemente rápida como para mantener la superficie saturada, la migración interna del agua se vuelve un factor que controla la velocidad de secado. Para determinar el coeficiente de difusión D se puede utilizar la segunda ley de Fick (ecuación 6), que relaciona las variaciones del contenido de humedad de la muestra (en este caso agua) con el tiempo y la geometría, durante el proceso de secado (Panchariya et al., 2002).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} \quad [6]$$

donde M es el contenido de humedad, t es el tiempo en segundos y r es espesor en metros. Para la resolución de la ecuación 6, se considera que el coeficiente de difusión es un coeficiente de difusión promedio, difusión efectiva D_{ef} y que la muestra es una placa plana infinita, con una distribución de humedad inicial uniforme, no tiene encogimiento y no existen resistencias al transporte de masa (Crank, 1975); obteniéndose la siguiente relación de humedad MR (ecuación 7):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right] \quad [7]$$

donde D_{ef} es el coeficiente de difusividad efectiva ($m^2 s^{-2}$), L es el espesor de la placa (m), t tiempo en segundos y n es un número positivo entero. Para tiempos de secado suficientemente largo, se puede tomar $n = 1$, con un error pequeño y la ecuación 7 queda (ecuación 8):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right) \quad [8]$$

El coeficiente de difusividad efectiva (D_{ef}) engloba los efectos de todos los fenómenos que pueden intervenir en la migración o pérdida de agua y su valor se calcula a través de los modelos matemáticos de la tabla 1, ajustados con los valores experimentales. Al tomar logaritmo natural en ambos miembros de la ecuación 8, se obtiene una ecuación que representa una recta, cuya pendiente depende de D_{ef} :

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 D_{ef} t}{4 L^2}\right) \quad [9]$$

Calculando el $\ln(MR)$ con los datos experimentales y graficando en función del tiempo, se determina el valor de la pendiente. Con el espesor de la lámina (L), se obtiene el coeficiente de difusión efectiva promedio durante el tiempo de secado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del comportamiento térmico del secadero

En la tabla 2 se muestran los valores máximos sobre la bandeja superior ($T_{a,sB3}$) de los parámetros característicos del secadero, para los dos primeros días. En el primer día el máximo de la temperatura sobre última bandeja ocurre a las 13,57 hora local, mientras que el segundo día a las 13,62 hora local. Como estos valores son aproximadamente iguales se advierte que la contracción del producto entre el primer y segundo día no fue significativa.

	1er. Día	2do. Día
Irradiancia (I) [$W m^2$]	1029	1003
Temperatura aire ambiente exterior ($T_{a,ext}$) [$^{\circ}C$]	43,5	47,6
Temperatura aire bajo bandeja inferior ($T_{a,bB1}$) [$^{\circ}C$]	46,7	49,5
Temperatura aire sobre bandeja inferior ($T_{a,sB1}$) [$^{\circ}C$]	69,3	72,6
Temperatura aire sobre bandeja media ($T_{a,bB2}$) [$^{\circ}C$]	72,2	81,8
Temperatura aire sobre bandeja superior ($T_{a,sB3}$) [$^{\circ}C$]	79,9	89,6

Tabla 2. Valores característicos del colector solar para la máxima Irradiancia

En la figura 4 se muestran las temperaturas, para distintos puntos en el recorrido del aire en el secadero y la irradiación incidente sobre superficie horizontal, para los 2 primeros días de los 5 días de secado. Del análisis de los datos experimentales de las temperaturas del aire en el interior del secadero, se advierte que la temperatura del aire se incrementa cuando asciende por el mismo, hasta llegar a la última bandeja.

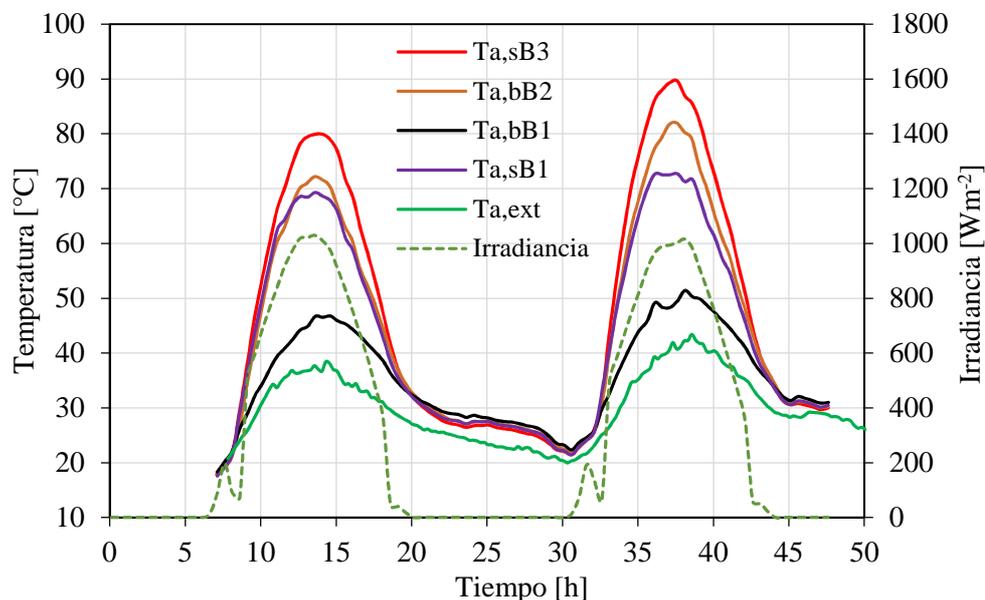


Figura 4. Variación de la temperatura del aire en el interior del secadero e irradiación incidente sobre superficie horizontal en función del tiempo.

Análisis de los datos del túnel de secado de laboratorio

El contenido inicial de humedad de la manzana fue de 85,1 % base húmeda, es decir 5,71 kg kg⁻¹ base seca (b.s.). Durante los primeros 30 min la pérdida de humedad fue lineal, evidenciando la existencia del período de secado a velocidad constante. Para analizar la cinética de secado durante el período de velocidad variable se consideraron los siguientes contenidos de humedad iniciales: muestra M1: 3,37267 kg kg⁻¹ b.s., muestra M2: 3,6722 kg kg⁻¹ b.s. y la muestra testigo Mt: 3,78109 kg kg⁻¹ b.s.

La variación del contenido de humedad respecto al tiempo de secado para los pretratamientos y el testigo, durante el periodo de velocidad variable, se muestran en la figura 6. Se observa que el contenido de humedad de las muestras disminuye exponencialmente con el tiempo de secado. Al inicio del proceso, durante una hora las muestras pre tratadas (M1 y M2) tienen una diferencia en la pérdida de humedad del orden del 8 %, pero hacia la mitad del secado ambas llegan a tener aproximadamente el mismo contenido de humedad, evidenciándose la diferencia en las variaciones del contenido de humedad de las muestras tratadas con la no tratada (testigo).

Para valores iguales de tiempo de secado (5,5 horas) se observa que el contenido de humedad para la muestra M1 pasa de 3,37 a 0,02 kg kg⁻¹ bs, la M2 de 3,67 a 0,05 kg kg⁻¹ bs y la muestra testigo Mt de 3,78109 a 0,42 kg kg⁻¹ bs. La duración del secado para la muestra testigo fue un 37 % más del tiempo empleado por las muestras tratadas, teniendo una diferencia en el contenido de humedad del orden del 6 % respecto al peso constante de las muestras tratadas.

En la figura 7 se observa que la velocidad de secado disminuye continuamente con la disminución del contenido de humedad. El proceso de secado presentó diferentes velocidades medias para cada una de las muestras: la muestra testigo tiene una velocidad media de 0,54 kg kg⁻¹ h⁻¹, con un máximo de 0,95 y un mínimo de 0,10 kg kg⁻¹ h⁻¹. Para la muestra con tratamiento M1 la velocidad media fue de 0,60 kg kg⁻¹ h⁻¹ y con un máximo de 0,92 kg kg⁻¹ h⁻¹ y un mínimo de 0,17 kg kg⁻¹ h⁻¹, mientras que para la muestra M2 la velocidad media fue de 0,64 kg kg⁻¹ h⁻¹, la máxima de 0,998 kg kg⁻¹ h⁻¹ y la mínima de

0,093 kg kg⁻¹ h⁻¹. Las muestras con tratamiento, si bien tienen diferentes velocidades promedio, finalizan prácticamente con la misma velocidad de secado.

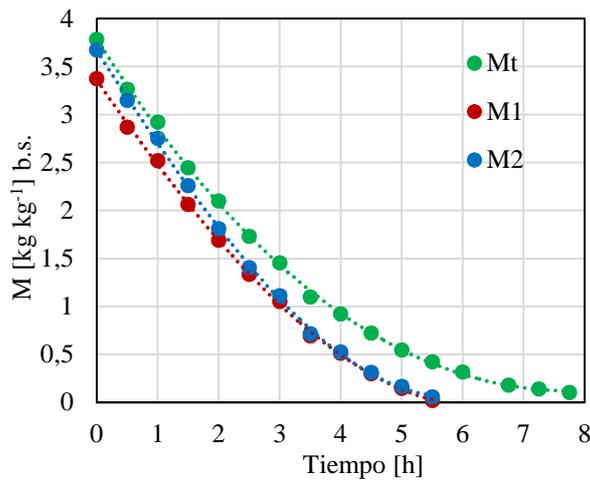


Figura 6. Contenido de humedad de la manzana con y sin tratamientos, túnel de secado laboratorio

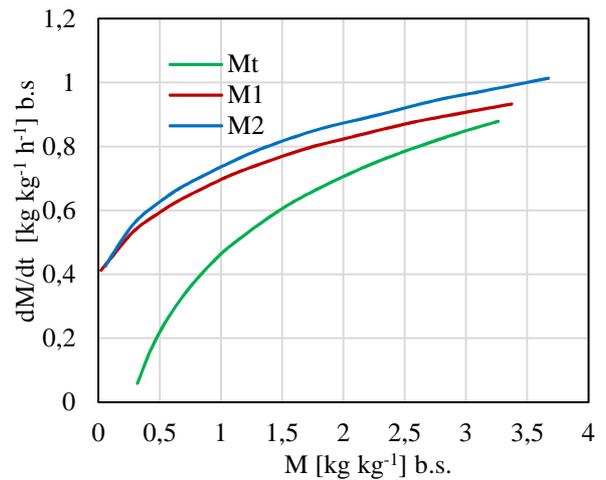


Figura 7. Velocidad de secado de la manzana con y sin tratamientos en túnel de secado de laboratorio

Las velocidades de secado de cada muestra (V_s), ajustadas por cuadrados mínimos, en función del contenido de humedad (M) y del tiempo (t) durante el proceso de secado en túnel de laboratorio, se detallan en la tabla 3. Los subíndices t , 1 y 2 se refieren a la muestra testigo y a los tratamientos 1 y 2 respectivamente.

$V_{st} = 0,3519 \ln (M_t) + 0,6424 \quad R^2 = 0,9901$	$V_{st} = - 0,0024 t^2 - 0,1322 t + 0,9765 \quad R^2 = 0,9985$
$V_{s1} = 0,2381 \ln (M_1) + 0,6161 \quad R^2 = 0,9919$	$V_{s1} = - 0,0119 t^2 - 0,0715 t + 0,9220 \quad R^2 = 0,9990$
$V_{s2} = 0,3374 \ln (M_2) + 0,6557 \quad R^2 = 0,9985$	$V_{s2} = - 0,0216 t^2 + 0,0459 t + 0,998 \quad R^2 = 0,9990$

Tabla 3. Ecuaciones de velocidad de secado en túnel en función del contenido de humedad y el tiempo

Análisis del secado solar con convección natural

El contenido inicial de humedad de la manzana fue de 84 % base húmeda. A los efectos de simplificar el análisis y discusión de los resultados, se presentan los datos correspondientes a la bandeja del medio.

En la figura 8 se muestra el contenido de humedad de las muestras M1, M2 y testigo (Mt), para el deshidratado de manzana en el secadero solar. El contenido de humedad de las muestras al inicio del proceso fue de 5,25 kg kg⁻¹ bs., llegando a las 21 horas de secado, sin contar el periodo nocturno, a niveles de 0,11 y 0,05 kg kg⁻¹ bs, muestras M1 y M2 respectivamente, mientras que el testigo llega a 0,61 kg kg⁻¹ bs.. Es decir que las muestras perdieron el 97,9 % (M1), 99,0 % (M2) y 88,4 % (Mt) de agua. Se advierte claramente la diferencia entre las distintas curvas de las muestras pretratadas y el testigo. Una vez finalizado el proceso, las rodajas de manzana fueron retiradas del secadero y acondicionadas en cajas y separadas en capas mediante papel, para lograr su homogeneización respecto al contenido de humedad.

En la figura 9 se muestran las gráficas correspondientes a la variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y en la tabla 4 se detallan las ecuaciones de las curvas de velocidad de secado de cada muestra, en función del contenido de humedad y del tiempo durante el proceso de secado solar, ajustadas por cuadrados mínimos. Se observa que la velocidad de secado fue mayor al inicio del proceso, reduciéndose logarítmicamente a medida que el contenido de humedad fue disminuyendo. Advirtiéndose además, que las muestras pretratadas mantienen entre ellas aproximadamente la misma diferencia de velocidad. Los subíndices t , 1 y 2 se refieren a la muestra testigo y a los tratamientos 1 y 2 respectivamente.

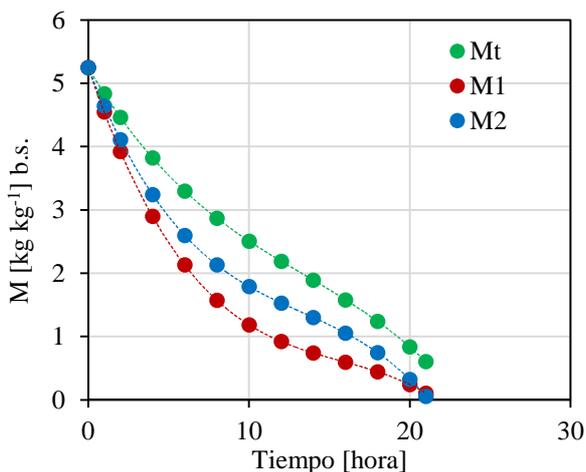


Figura 8. Contenido de humedad de la manzana con y sin tratamiento, secado solar

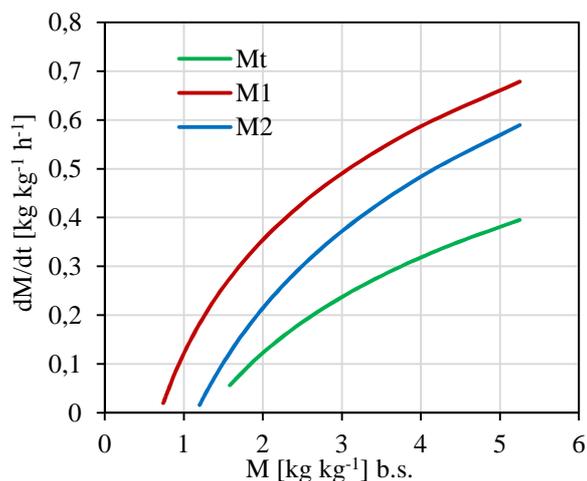


Figura 9 Variación de la velocidad de secado solar en función del contenido de humedad

$V_{st} = 0,2823 \ln (Mt) - 0,0731$	$R^2 = 0,9246$	$V_{st} = 0,0016 t^2 - 0,0424 t + 0,4333$	$R^2 = 0,9990$
$V_{s1} = 0,3362 \ln (M1) + 0,1211$	$R^2 = 0,9664$	$V_{s1} = 0,0027 t^2 - 0,0858 t + 0,7445$	$R^2 = 0,9990$
$V_{s2} = 0,3888 \ln (M2) - 0,0553$	$R^2 = 0,9522$	$V_{s2} = 0,003t^2 - 0,0799t + 0,6453$	$R^2 = 0,9990$

Tabla 4. Ecuaciones velocidad de secado solar en función del contenido de humedad y del tiempo

Modelado de las curvas de secado

De todos los modelos ajustados se seleccionaron aquellos con más alto R^2 , y los valores más bajos de χ^2 , RMSE, MBE, detallándose los resultados del análisis estadístico para el túnel de laboratorio, Tabla 5, y secadero solar tabla 6. El resto de los modelos fueron desechados porque las variables no difieren significativamente de cero (coeficiente de confianza 0,95) y/o la correlación de los coeficientes estimados fue superior a 0,80.

Modelo	Tratamientos	R^2	χ^2	RMSE	MBE
NEWTON	Testigo	0,984	0,00155642	0,03819869	0,04345388
	Jugo de Limón	0,965	0,00392126	0,05995408	0,03284654
	Metabisulfito	0,966	0,00387148	0,05957225	0,02538925
PAGE	Testigo	0,998	0,00017616	0,01241533	0,05295948
	Jugo de Limón	0,994	0,000785	0,02557666	0,08908734
	Metabisulfito	0,996	0,00052059	0,02082837	0,07359535
HENDERSON PABIS	Testigo	0,988	0,0012746	0,0333957	0,12640818
	Jugo de Limón	0,971	0,00356727	0,05452269	-0,134347
	Metabisulfito	0,972	0,00341224	0,05332479	0,13385232
AGHBASHLO	Testigo	0,999	0,000068495	0,00774162	0,00084235
	Jugo de Limón	0,999	0,00009633	0,00895964	0,02220384
	Metabisulfito	0,999	0,000062952	0,00724296	0,00183495

Tabla N° 5. Túnel convección forzada (laboratorio)

Modelo	Tratamientos	R^2	χ^2	RMSE	MBE
NEWTON	Testigo	0,998	0,00012683	0,00157912	0,00157912
	Jugo de Limón	0,999	0,00095264	0,00882855	0,00157955
	Metabisulfito	0,995	0,00047031	0,01961634	0,00191555
PAGE	Testigo	0,998	0,00011523	0,00970957	0,00078036
	Jugo de Limón	0,999	0,00007641	0,00169709	0,00790699
	Metabisulfito	0,999	0,00012751	0,010214	0,00064145

HENDERSON PABIS	<i>Testigo</i>	0,998	0,00011395	0,00016559	0,00965585
	<i>Jugo de Limón</i>	0,999	0,00009,451	0,00879395	0,00879395
	<i>Metabisulfito</i>	0,996	0,0003531	0,01699713	0,00162427
AGHBASHLO	<i>Testigo</i>	0,998	0,00012586	0,01014768	0,00140950
	<i>Jugo de Limón</i>	0,999	0,00004767	0,00624582	0,00123248
	<i>Metabisulfito</i>	0,999	0,00012915	0,0102797	0,00041581

Tabla 6. Secadero solar convección natural

Para la cinética de secado correspondiente a los ensayos en túnel de laboratorio y en secadero solar con convección natural, el mejor ajuste fue el de Aghbashlo et al. (2009). La variación de la relación de humedad experimental y predicha para este ajuste en ambos secaderos se muestra en la figura 10. Esto reafirma que el modelo de Aghbashlo proporcionó un buen acuerdo entre las relaciones de humedad, experimental y predicha.

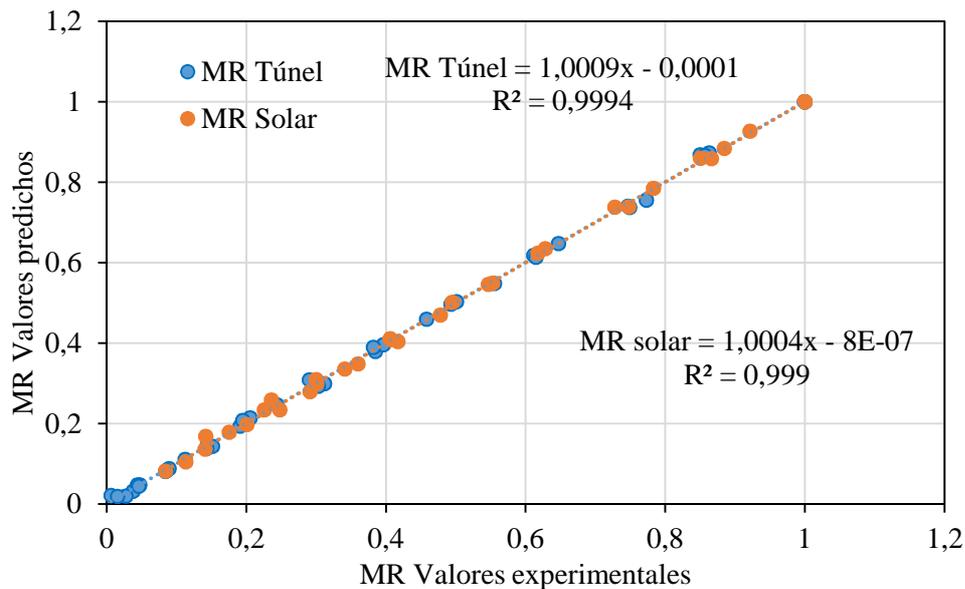


Fig. 10. Variación de la relación de humedad experimental y predicha para ambas experiencias para ajuste de Aghbashlo

Cálculo de la Difusividad efectiva de la humedad

Durante el proceso de secado, en el túnel de laboratorio y secadero solar, las experiencias fueron realizadas hasta peso constante y se obtuvo los coeficientes de difusión mediante el logaritmo natural de MR, ecuación 9. En las figuras 11 y 12 se muestran las gráficas del Ln(MR) en función del tiempo para los dos tipos de secado. Las pendientes de estas curvas permiten obtener la difusividad efectiva de las rodajas de manzana, tabla 7.

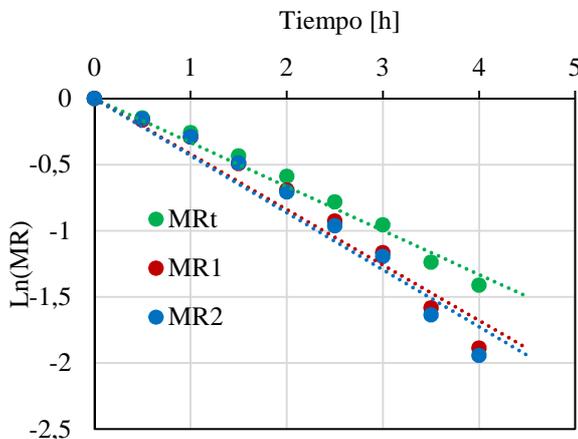


Figura 11. Correlación logarítmica para curvas en túnel de secado convección forzada

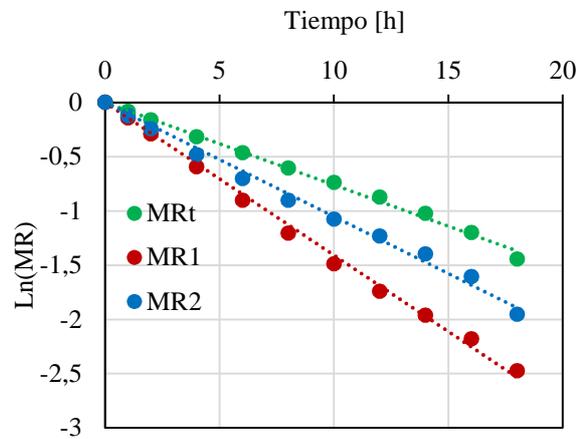


Figura 12. Correlación logarítmica para curvas en secado solar convección natural

Método de secado	Espesor Rodajas [mm]	Difusión Efectiva [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	R^2
Túnel Lab. Mt	4,744	$8,4244 \cdot 10^{-10}$	0,983049
Túnel Lab. M1	4,844	$1,1076 \cdot 10^{-9}$	0,958490
Túnel Lab. M2	4,575	$1,0167 \cdot 10^{-9}$	0,955372
Solar Mt	4,760	$1,9244 \cdot 10^{-10}$	0,995491
Solar M1	4,850	$3,5686 \cdot 10^{-10}$	0,996106
Sola M2	4,560	$2,662710^{-10}$	0,992389

Tabla 7. Difusión efectiva de las rodajas con ambos secaderos.

CONCLUSIONES

El método de secado con aire por convección forzada dio como resultado una velocidad de secado promedio de $0,63 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, mientras el secado con energía solar en convección natural una velocidad de secado promedio de $0,22 \text{ kg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

En el secado en el túnel de laboratorio las muestras tratadas con jugo de limón presentaron una diferencia del 7 % en el contenido de humedad respecto a las tratadas con metabisulfito de sodio al finalizar el proceso. En el secado solar la diferencia entre el tratamiento con limón respecto al metabisulfito de sodio es del 1%. En ambos casos los tratamientos cumplen su cometido, obteniéndose con respecto a la muestra testigo una diferencia en el contenido de humedad final del orden 10 %, tanto en el secadero túnel de laboratorio como en el secadero solar. Los pretratamientos son aconsejables para obtener un producto de buena calidad. El ácido cítrico y el metabisulfito de sodio evitaron el pardeamiento de la fruta, pero se aconseja el uso del primero por no presentar toxicidad.

El modelo propuesto por Aghbashlo fue el más adecuado para describir el comportamiento de secado de rodajas de manzana, tanto en el secadero túnel de laboratorio como en el solar con convección natural. Si bien ambos responden a este modelo, los parámetros de ajuste son diferentes. De esta manera se dispone de un modelo que tiene el valor más alto de R^2 y con valores razonables de χ^2 , MBE y RMSE, con un coeficiente de confianza del 95 %.

El modelo de difusión de Fick, para un coeficiente de difusión promedio D_{ef} , mostró un buen ajuste lineal con respecto a los resultados experimentales obtenidos de los dos secaderos y permitieron estimar la difusividad efectiva de la humedad. La difusividad de humedad efectivas están entre $1,017 \times 10^{-9}$ a $8,424 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el secado en túnel y $1,924 \times 10^{-10}$ a $3,569 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para secado solar.

REFERENCIAS

- Aghbashlo, M., M.H. Kianmehr, S. Khani and M. Ghasemi, (2009). Mathematical modeling of carrot thin-layer drying using new model. *Int. Agrophysic.*, Vol. 23: 313–317.
- Bistoni S., Iriarte A., García V. y M. Watkins, (2008). Estudio de un ensayo de secado de tomate en secadero solar indirecto, *Investigaciones en Facultades de ingeniería del NOA, CODINOA*, Vol. 2, pp. 55- 60.
- Bistoni S., Iriarte A., Luque V. y S. Gómez, (2010). Evaluación del comportamiento de un secador solar mixto para pequeños productores, *Investigaciones en Facultades de ingeniería del NOA, CODINOA*, Vol 2, 295- 300.
- Crank, (1975). *The Mathematics of diffusion*. Oxford University Press, London
- Condorí M., Durán G., Vargas D. y R. Echazú, (2009). Secador solar híbrido. Primeros ensayos, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 13, pp 02.35- 02.42.

- Condorí M., Durán G., Echazú R.y G. Diaz Russo, (2010). Secador industrial híbrido solar- biomasa para la producción continua de pimiento deshidratado, *Energías Renovables y medio ambiente*, Vol 25, pp 81-92.
- Hossain M.A. y B.K Bala, (2007). Drying of hot chilli using solar tunnel drier, *Solar Energy*, Elsevier, Vol 81, pp 85-92.
- Jairaj K.S., Singh S.P. y K.Srikant, (2009). A review of solar dryers developed for grape drying, *Solar Energy*, Elsevier, Vol 83, pp. 1698-1712.
- Kaya A., Aydin O., Demirtas C. (2007): Drying kinetics of red delicious apple. *Biosystems Engineering*, Vol. 96, pp517–524.
- Krokida, M.K. and Z.B. Maroulis, (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Dry. Technol.*, Vol.15: 1145–1155.
- Lewicki P P., Jakubczyk E. (2004): Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp 307–314.
- Lewicki P.P. (2006): Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*, Vol 17, pp. 153–163.
- Pangavhane D., R. Sawhney y P. Sarsavia, (2002). Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. *Energy*, Vol. 27, pp 579-590.
- Sadegh Seiedlou, Hamid R. Ghasemzadeh, Nasser Hamdami, Faramarz Talati, Mohammad Moghaddam. (2010). *International Journal of Agriculture & Biology*, pp 171–178.
- Togrul y Pehlivan, 2004. Togrul, I.T. & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65, pp.413–425.
- Velic D., Planinic M., Tomas S., Bilic M. (2004): Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, Vol. 64, pp. 97–102.

DRYING KINETICS AND MODELLING OF APPLE IN FORCED LABORATORY DRYER AND IN A SOLAR UNDER NATURAL CONVECTION

ABSTRACT: In the present work, apple drying in a forced convection laboratory tunnel and in a natural convection solar dryer is analyzed. Dryers and drying kinetics for both devices are described, as well as the thermal evaluation of the solar dryer. In both cases the product was previously treated with lemon juice and sodium meta bisulfite. The influence that both treatments have on the final product is studied. Ten mathematical drying models were used to adjust the experimental data. According to the statistical criteria (R^2 , χ^2 , MBE and RMSE), the Aghbashlo model was the best, in both dryers, for describing the drying behavior of the apple slices. The treatment with lemon juice in the two trials resulted in faster drying, better appearance and less toxicity.

Keyword: drying kinetic, natural convection drying, apple, pretreatment