

**ANÁLISIS DEL SECADO DE PIMIENTO *Capsicum annuum* L. EN CHILECITO,  
LA RIOJA. APORTES PARA LA APROPIACIÓN DE TECNOLOGÍA SOLAR**

**S. Bistoni<sup>1</sup>, A. Iriarte<sup>1,3</sup>, V. García<sup>1</sup> y M. Calahorra<sup>2</sup>**

(1) Grupo de Energías Renovables Catamarca, INENCO – CONICET

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Catamarca

(2) Estación Experimental Chilecito del INTA, Chilecito, La Rioja

(3) Investigador del CONICET

**ANALYSIS OF THE PEPPER DRYING *Capsicum annuum* L. IN CHILECITO, LA RIOJA.  
CONTRIBUTIONS FOR THE SOLAR TECHNOLOGY APPROPRIATION**

**ABSTRACT**

The Experimental Agricultural and Livestock Station (EEA) of INTA, Chilecito, La Rioja, has been working with producers of pepper in order to improve the quality of the product, in the stages of planting, harvesting and post-harvesting. About the post-harvest stage, most producers use traditional methods for pepper drying, so they do not always achieve good quality products. The adoption of solar dryers can reverse this problem but it is important to take into account the cultural barriers that prevent a lasting transfer. In this work, the process of pepper solar drying in four types of dryers is analyzed. A methodology for the appropriation of these new technologies is proposed. The dryers were loaded with the pepper provided by the producers who were given active participation in the whole process. The drying curves and a mathematical model are described; a comparative table of the climatic variables, constant parameters and operation of the different dryers are presented. For the dryer with a chimney and for the micro tunnel, the best fitting model was Page; while for the tunnel type dryer and the staircase type was the logarithmic model. After drying, the drying curves and the drying designs were analyzed with the producers. This allowed them to compare their "drying methodology" with the results obtained in the proposed solar systems. The comparison table of the behavior of each of the solar dryers, for the same climatic conditions, together with the drying kinetics, is a very useful tool for the evaluation of the behavior.

**Key words:** solar drying, paprika, mathematical modeling of solar drying, solar drying transference

**RESUMEN**

En la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del INTA, Chilecito, La Rioja, se trabaja con productores de pimiento pimentonero, en las etapas de siembra, cosecha y pos cosecha, a fin mejorar la calidad del producto. Con respecto a la pos cosecha, la mayoría de los productores utilizan métodos tradicionales para el secado de pimiento

por lo que no siempre logran productos de buena calidad. La adopción de secaderos solares puede revertir este problema pero es importante tener en cuenta las barreras culturales que impiden una transferencia perdurable. En este trabajo se analiza el proceso de secado solar de pimiento en cuatro tipos de secaderos y se propone una metodología para la apropiación de esta nueva tecnología. Los secaderos se cargaron con el pimiento aportado por los productores a quienes se les dio participación activa en todo el proceso. Se describen las curvas de secado, se plantea un modelo matemático y se presenta un cuadro comparativo de las variables climáticas, parámetros de construcción y datos de funcionamiento de los distintos secaderos. Para el secadero con chimenea y para el microtúnel, el modelo que mejor ajustó fue el de Page; mientras que para el secadero tipo túnel y el tipo escalera fue el logarítmico. Una vez finalizado el secado, se analizaron con los productores las curvas de secado y los diseños de los secaderos. De esta forma pudieron comparar sus “metodología de secado” con los resultados obtenidos en los sistemas solares propuestos. La planilla de comparación del comportamiento de cada uno de los secaderos solares, para las mismas condiciones climáticas, junto a la cinética de secado constituye una herramienta útil a la hora de evaluar el comportamiento de los mismos.

**Palabras claves:** secado solar, pimiento pimentonero, modelos matemáticos de secado solar, transferencia de secado solar

## **INTODUCCCIÓN**

Chilecito, La Rioja, es la ciudad cabecera del departamento homónimo. Se encuentra situada en el Valle Antinaco - Los Colorados, entre la Sierra de Velazco al este y la de Famatina al Oeste. La principal actividad productiva de Chilecito corresponde a la Agricultura. Ordenadas por importancia en superficie se mencionan: olivo, vid, nogal, jojoba, hortalizas, forrajes, y otros cultivos como membrillos, duraznos e higueras y plantas aromáticas, entre las que se destaca el pimiento para pimentón. Los productos agrícolas son procesados por la agroindustria de mayor escala y también en forma artesanal por pequeños productores. Entre estos productos sobresalen: vinos, frutos secos, mostos, jugos, aceituna de mesa, aceite de oliva, cera de jojoba y conservas hortícolas.

En la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del INTA, Chilecito, La Rioja, se trabaja en una línea que compara los resultados de cosecha y pos cosecha de cuatro variedades de pimiento para pimentón. Se busca la reactivación de pequeños productores, insertándolos en la cadena productiva al mejorar la calidad de sus productos. Para alcanzar estas metas es necesario que los productores adopten tecnologías acordes a los recursos disponibles en la zona, durante la siembra, cosecha y poscosecha. Con respecto a este último, se puede mencionar que la mayoría de los productores utilizan métodos tradicionales para el secado de pimiento por lo que no siempre logran productos de buena calidad. La adopción de secaderos solares puede revertir este problema.

Existen numerosos y variados diseños de secaderos solares. Muchos de ellos son de bajo costo, fácil mantenimiento y de construcción sencilla (Bala y Woods, 1989, Jairay *et al.*, 2009, Iriarte *et al.*, 2010). Los elementos básicos de un secadero solar son el colector donde la radiación solar calienta el aire y la cámara de secado donde se coloca el producto a deshidratar. De acuerdo a la forma en que estos dos elementos se integren en el equipo tenemos (Espinoza y Saravia, 2010):

- Secaderos solares indirectos: los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación solar no incide sobre el producto que está en la cámara de secado.
- Secaderos solares directos: los dos elementos se juntan y la cámara que contiene el producto cumple también la función de colector solar
- Secaderos solares mixtos: la colección de radiación se realiza tanto en el colector previo a la cámara como en la misma cámara.

En estos equipos solares, el aire que remueve la humedad del producto, puede hacerse circular mediante convección natural, es decir utilizando los gradientes de temperatura, o por convección forzada mediante el uso de ventiladores.

En cuanto a la transferencia de esta tecnología solar, generalmente, los equipos a transferir han sido técnicamente probados y están de acuerdo a las actividades reales en donde se pretenden aplicar. Pero las barreras personales o culturales son importantes y es necesario tenerlas en cuenta para que los resultados de este proceso sean perdurables en el tiempo (Bistoni *et al.*, 2010).

En los últimos años y ante la falta de sostenibilidad de las transferencias de tecnología solar han surgido enfoques más participativos. En este contexto se espera que los beneficiarios sean los principales artífices de la solución de sus problemas (Chemes *et al.*, 2014; Sosa *et al.*, 2014). Es de destacar también, los esfuerzos que realizan los distintos actores que se dedican a la transferencia de energías renovables para aunar criterios sobre esta problemática (Belmonte *et al.*, 2014), llegándose a la conclusión que la transferencia debe ser un proceso interactivo entre todos los actores: beneficiarios y técnicos.

El propósito del presente trabajo es por un lado, analizar el proceso de secado de pimiento para pimentón en los secaderos solares construidos en el EEA Chilecito y proponer una metodología para la apropiación de nuevas tecnologías, mediante la cual se pretende ayudar a los productores de pimiento de la localidad, a adoptar nuevos criterios respecto al secado. Se describen las curvas de secado de pimiento variedad Yokavil y se plantea un modelo matemático para cada secadero, con el objetivo de describir matemáticamente el proceso de secado.

## MATERIALES Y MÉTODO

Antes de comenzar la cosecha del pimiento, se realizó una jornada dirigida por técnicos del INTA Chilecito y con la participación de los productores de la zona. El objetivo general de la misma fue elaborar un diagnóstico dinámico de la situación en que están inmersos los productores de la zona; conocer cómo piensan, medios con que cuentan, en que forman utilizan los recursos, qué técnicas utilizan, etc. Durante esta jornada, se procuró priorizar e interrelacionar los problemas identificados, formular claramente el problema central, sus causas y efectos, elaborando un esquema que relacione estas últimas con el propósito de que los productores obtengan un panorama general de la problemática.

Posteriormente se realizó una reunión entre el personal del Grupo de Energía Solar Catamarca (GERCA) y técnicos de la EEA Chilecito, La Rioja del INTA, en donde se pusieron en común las inquietudes respecto al secado del pimiento. Se explicó la forma de trabajo con los productores para mejorar todo lo referido a siembra y cosecha del pimiento pimentonero y se puso de manifiesto la necesidad de mejorar el proceso de secado a pesar que en dicha Estación ya se estaba trabajando al respecto. De esta reunión y con la idea de profundizar el estudio del secado solar y la apropiación de esta tecnología, surgió la idea de construir distintos diseños de secaderos solares dentro del predio de la EEA Chilecito de tal forma que los productores pudieran tener acceso directo a la información sobre nuevas técnicas de secado solar y utilizar los equipos allí construidos. A tal fin se construyeron dos secaderos solares con convección natural y uno con convección forzada.

Una vez cosechado el pimiento se realizó una jornada con los productores, dirigida por técnicos del (GERCa). Durante la misma se colocó el pimiento a deshidratar en los cuatro secaderos. Finalizado el proceso de secado se realizó otra jornada con productores para el análisis y discusión de los resultados obtenidos. En esta jornada participativa se analizaron las ventajas y desventajas de los secaderos y se analizaron las curvas de secado de la variedad Yokavil obtenidas en los mismos. Se utilizó esta variedad porque estaba presente en todos los equipos.

### ❖ *Descripción de los secaderos solares*

#### **a. Secaderos de convección natural**

- *Secaderos tendaleros tradicionales*: La EEA Chilecito cuenta con varios secaderos tendaleros comunes o tradicionales. Los mismos están construido con soportes de madera y las camas con malla antigranizo. Tienen una longitud de 20 m, ancho 1,25 m y están elevados del suelo 0,80m.
- *Secaderos tendaleros con cobertura plástica (microtúnel)*: Son iguales que los tradicionales con una cubierta de plástico transparente cuya estructura es curva y de hierro liso de 8 mm, con una altura máxima de 0,45 - 0,50 m aproximadamente desde la malla antigranizo. Para permitir la ventilación interior de los

microtúnel y evitar condensaciones, en la parte central de las cubiertas y a lo largo de los mismos, poseen 5 hileras de perforaciones de 1,25 mm de diámetro. En este diseño el plástico está tensionado y se levantan ambos laterales cuando es necesario ventilar (Carabajal 2002), por lo cual la estructura es más rígida y resistente que los tradicionales.

- *Secadero solar con chimenea (“secadero chimenea”)*. Básicamente el sistema está constituido por dos partes principales: a) el colector – acumulador de calor y b) la cámara o gabinete de secado., Fig.1 El primero, está conformado por una platea de piedras graníticas seleccionadas, ubicadas a nivel del suelo y acomodadas de manera de conformar un espesor aproximadamente uniforme. Tiene 3 m de largo y se extiende 2,50 m hacia adelante de la cámara de secado. En su extremo frontal inferior, una abertura de 0,15 m de alto, por toda su longitud permite la entrada del aire desde el exterior. Está protegida contra el ingreso de animales e insectos. La cámara de secado, ubicada en la parte posterior del colector está sobre elevada 0,80 m del nivel del terreno natural y tiene 1 m de ancho por 3 m de longitud y posee cubierta de plástico transparente.

La salida de aire se realiza a través de un ducto trapezoidal de 0,15 m de ancho, 0,50 m de altura y 3 m de largo, que hace las veces de una chimenea solar. Al terminar la chimenea, sobre el ducto tiene un protector de para la lluvia. La base está construida con una malla de alambre galvanizado colocada dentro de un marco de madera, reforzado por planchuelas de hierro para conferirle mayor rigidez a la superficie de apoyo. Sobre esta malla, se colocan las bandejas de madera con malla plástica (tipo media sombra). La estructura del secadero está construida con listones de madera con una forma cuasi-triangular. Los lados inclinados hacia el norte están cubiertos por plástico transparente LDT (150 micrones), mientras que en su pared posterior vertical está cubierta por plástico negro (200 micrones). De esta manera, también la chimenea recibe radiación directa que es colectada por la parte posterior interna. Por la parte posterior está el acceso de la bandejas con sus correspondientes sistemas de cierre, (Iriarte *et al.*, 2010).

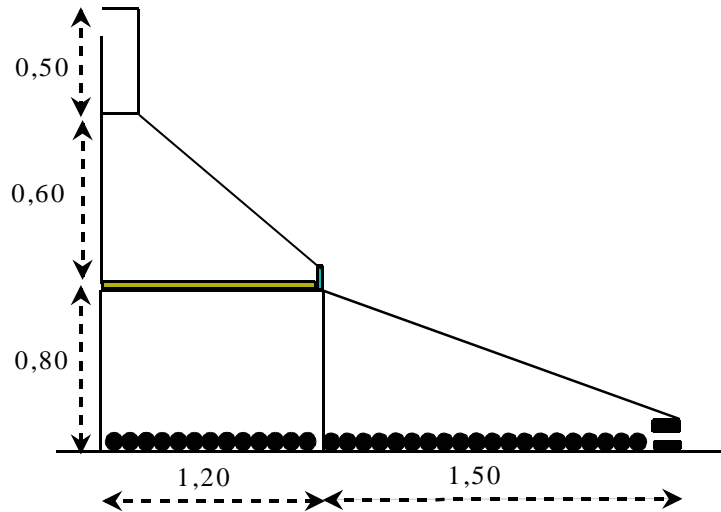


Fig. 1. Esquema de secadero solar con chimenea

- *Secadero solar con estantes escalonados* (“secadero escalera”). El secadero es tipo gabinete con estantes escalonados en donde se colocan las bandejas con el producto, Fig.2. Consta de una caja con estructura de hierros “L” 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. El modo de calentamiento es directo por lo que el interior de la caja está pintado de negro para que funcione como un colector solar. El secadero está inclinado para favorecer la captación de la radiación solar. El secadero está dividido en tres compartimentos, correspondiente a las tres bandejas que posee, Estas partes están divididas por separadores de policarbonato, colocados en forma vertical respecto a la superficie del suelo. En estos separadores se han realizado tres agujeros 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 blanco 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 (0,80 %) y van colocadas inclinadas respecto a la superficie horizontal, de manera tal que cuando el secadero está inclinado, las bandejas quedan horizontales (Bistoni et al., 2012).

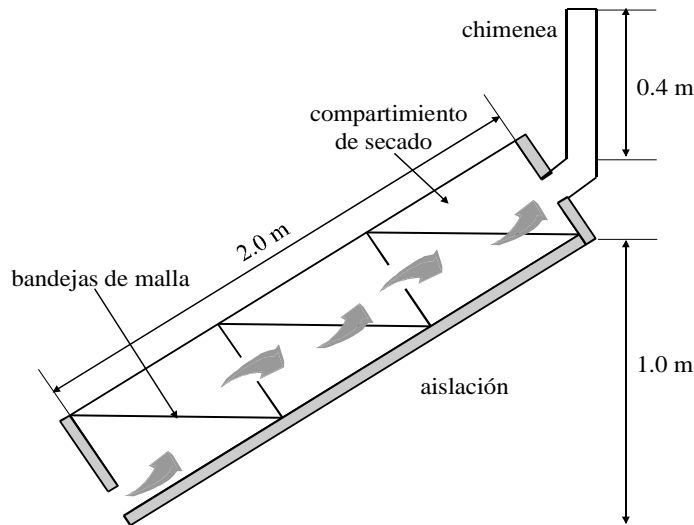


Fig.2.Esquema secadero solar escalera

**b. Secadero de convección forzada**

- *Secadero solar tipo túnel (“secadero túnel”)*: El secadero consiste en un tendalero de 0,80 m de alto, 1,80 m de ancho y 16 m de largo, dividido en dos partes; una parte es el colector solar y la otra el secador, que también recibe radiación solar. Ambas partes están en el mismo plano, Fig. 3 (a) y 3(b).

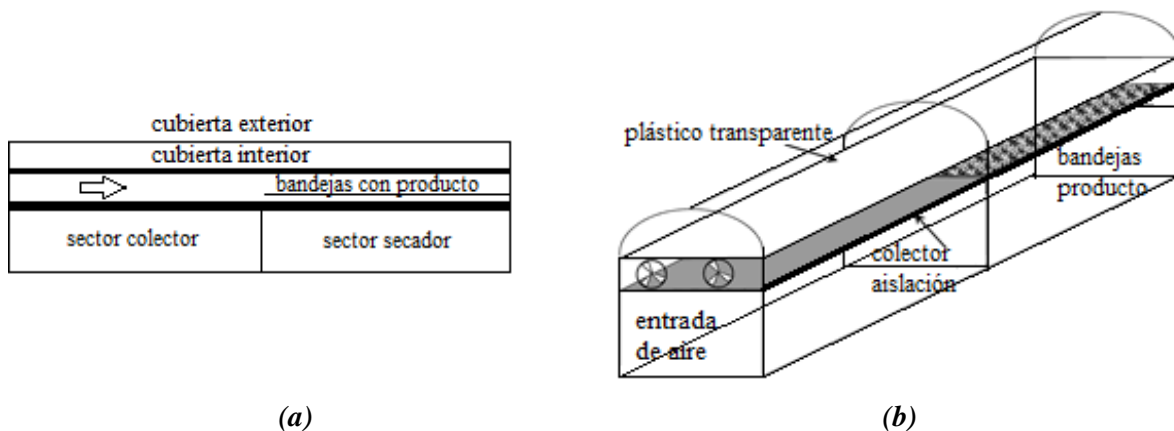


Figura 3. (a). Corte del secadero tendalero túnel; (b) Vista del secadero tendalero túnel

Tanto el colector como el secador tienen una placa colectora de papel de aluminio pintada de negro y por debajo 0,05 m de aislación de lana de vidrio. A 0,20 m sobre placa colectora (sector colector) y sobre las bandejas (sector secadero) hay una cubierta plana de plástico UV térmico, formando un ducto por donde circula el aire, impulsado por dos ventiladores axiales de 45 W cada uno, colocados en el ingreso al colector. Todo el sistema, colector y secadero, tiene una segunda cubierta semicircular de plástico. La carga y descarga por los costados del módulo de secado. Las bandejas tienen un ancho de 0,85 y un largo de 0,98 m, con estructura de madera y cubiertas con media sombra, para sostener el producto. Las bandejas tienen una superficie total de 14,4 m<sup>2</sup>, es decir que el gabinete de

secado tiene capacidad para 16 bandejas, ocho de cada lado. Una vez dentro del módulo, las bandejas son protegidas por unas puertas de madera, que permite lograr estanqueidad en el secador, (Iriarte *et al.*, 2015).

En la fig. 4 (a) y 4 (b) se muestran los tendaleros tradicionales y un tendalero con cobertura construidos por la E.E.A. Chilecito, mientras que en la Fig. 5 (a), (b) y (c) se muestran los tres secaderos solares construidos por el GRECa en el predio de EEA Chilecito.

#### ❖ *Secado de pimiento*

Los secaderos se evaluaron higrotérmicamente y se realizaron las curvas de secado para las distintas variedades, solo se muestra en este trabajo el comportamiento de la variedad Yokavil, en los distintos equipos solares. Respecto del microtúnel no se dispone de datos higrotérmicos.

#### • *Análisis higrotérmicos de los secaderos*

A los efectos del análisis de los secaderos, chimenea, escalera y túnel fueron ensayados midiendo distintos puntos la temperatura en cada secadero, la temperatura ambiente, la irradiancia sobre superficie horizontal, para los días de secado de pimiento para pimentón.



Figura 4. (a) Secadero tendalero de pimiento; (b) Secadero tendalero microtúnel de pimiento



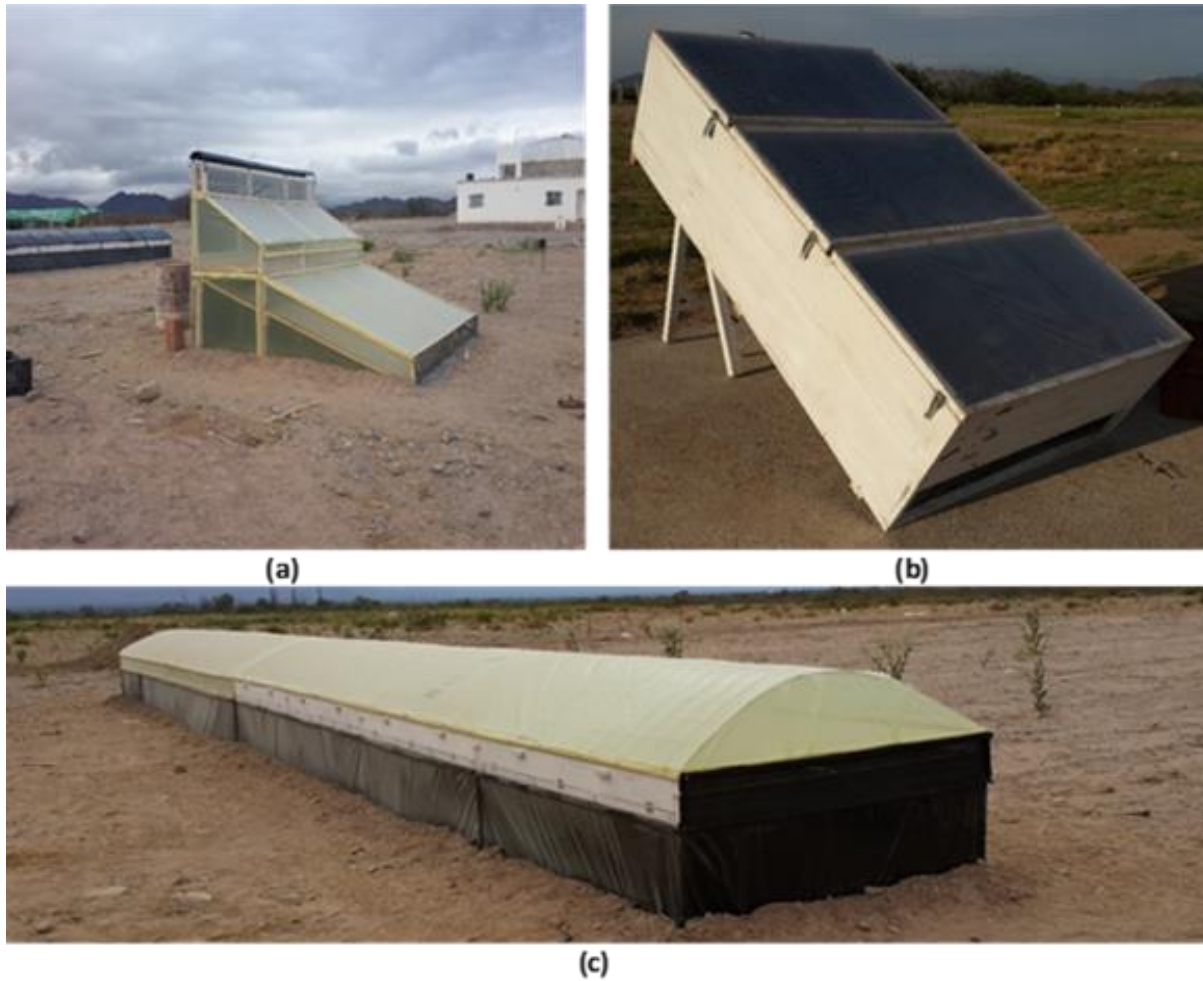


Figura 5. (a) Secadero tendalero con chimenea solar; (b) Secadero solar tipo escalera; (c) Secaderos solares tipo túnel. Construidos en la EE Chilecito del INTA

- **Cinética de secado**

El material utilizado para estudiar el proceso de secado fue cuatro cultivares de pimiento para pimentón (*Capsicum annuum* var.) Yokavil INTA, Encalilla alargado INTA, Experimental “D” y Lautaro INTA, cosechadas en la E.E. INTA Chilecito, La Rioja. En la Fig. 6 se muestran las variedades de pimiento utilizadas en la experiencia.



Fig. 6. Variedades de pimiento ensayadas

Para obtener las curvas de secado de las distintas variedades se realizaron pesadas horarias durante los días de secado. El peso seco del producto se obtuvo secando una muestra de cada variedad en una estufa con temperatura de 102 °C, hasta obtener peso constante.

Para la cinética de secado se utilizó el contenido de humedad en base seca (kg de agua/kg de producto seco) definido por:

$$M = \frac{(P - P_s)}{P_s} \quad [1]$$

donde p es el peso de la muestra y Ps es su peso seco.

Para normalizar las curvas de secado, es decir para que no dependan del peso inicial de cada muestra y facilitar la comparación de los procesos de secado en los distintos secaderos, el contenido de humedad en base seca (bs) se dividió por el contenido de humedad inicial (bs) de cada muestra, transformándolo en un parámetro adimensional denominado relación de humedad (MR). Por lo tanto, la relación de humedad (MR) se define por la ecuación (2):

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad [2]$$

donde M es el contenido de humedad instantánea (bs); M<sub>0</sub> contenido inicial (bs) y M<sub>e</sub> 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 (ec. 2) se simplifica a ec. (3):

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad [3]$$

La velocidad de secado se calculó mediante la ecuación (4)

$$dM = \text{Velocidad de secado} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \quad [4]$$

Las mediciones de temperatura y humedad se realizaron con Data Logger tipo HOBOS tipo U12 individuales que permiten medir temperaturas en el rango de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  (precisión de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , resolución de  $0,02^{\circ}\text{C}$ ) y humedades relativas del aire entre 10 - 90 % (precisión de  $\pm 1\%$ , resolución de  $0,1\%$ ). Los sensores se ubicaron a lo largo del sistema en la dirección del flujo de aire, protegidos de la radiación solar directa. Los registros fueron cada 15 minutos durante el proceso de secado. La radiación solar se midió con un piranómetro horizontal Kipp & Zonen ( $\pm 5\%$ ) mientras que las variables meteorológicas se determinaron con la estación meteorológica instalada en el lugar de la experiencia.

La velocidad del aire dentro del secadero fue medida con un anemómetro de hilo caliente, marca TSI 1650 ( $\pm 0,05\text{ m s}^{-1}$ ), en diferentes puntos en dirección transversal y a lo largo del colector y secadero.

Las muestras testigos se pesaron con una balanza electrónica (Mettler  $\pm 0,1\text{g}$ ) y la pesada inicial y final de todo el producto con una balanza de plato ( $\pm 1\text{g}$ ).

- **Modelo matemático de las curvas de secado**

El modelado de la cinética de secado de productos agrícolas ha sido extensamente investigado (Tunde - Akintunde, 2011; Kavak Akpinar y Bicer, 2008). Los modelos más utilizados se muestran en la Tabla 1. Estos modelos fueron aplicados a los datos experimentales usando técnica de regresión.

El análisis se realizó con el programa SPSS (Statistical Package for Social Scientists) versión 22 software package, para una 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 parámetros estadísticos chi-cuadrado reducido ( $\chi^2$ ), 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  $\chi^2$ , MBE y RMSE. Por otro lado se desecharon los modelos en que las variables no difieren significativamente de cero, aceptándose los modelos que tienen intervalos de confianza igual o mayor a 0,95.

Nombre Modelo	Ecuación del modelo	Nombre Modelo	Ecuación del modelo
<i>Newton</i>	$MR = \exp(-kt)$	<i>Wang and Singh</i>	$MR = 1+at+bt^2$
<i>Page</i>	$MR = \exp(-kt^n)$	<i>Page modificado</i>	$MR = \exp[-(kt)^n]$
<i>Henderson and Pabis</i>	$MR = a \exp(-kt)$	<i>Verma et al.</i>	$MR = a \exp(-kt)+(1-a) \exp(-bt)$
<i>Logarítmico</i>	$MR = a \exp(-kt)+c$	<i>Thomson</i>	$t = a \ln(MR)+b (\ln(MR))^2$
<i>Dos Términos</i>	$MR = a \exp(-k_0t)+b \exp(-k_1t)$	<i>Midilli y Kucuk</i>	$MR=a \exp(-kt^n)+bt$

Tabla N° 1. Modelos matemáticos para describir la cinética de secado

Los parámetros estadísticos se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad [5]$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i}) \quad [6]$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pred,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad [7]$$

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

## RESULTADOS

Todos los secaderos se cargaron simultáneamente con las distintas variedades de pimiento. El proceso de medición para la cinética de secado se realizó entre las 8 y 19 horas, período en el cual la radiación solar es mayor de  $100 \text{ W m}^{-2}$ .

### ❖ *Análisis higrotérmico de los secaderos*

A los efectos del análisis del comportamiento durante los ensayos se midieron la temperatura y humedad ambiente, la irradiancia sobre superficie horizontal y la temperatura y humedad en distintos puntos de los secaderos. Se detallan los resultados de solo tres días de ensayo. Los datos de temperaturas y humedad no fueron registrados para el secadero tipo microtúnel.

#### • *Secadero Chimenea*

En la Fig. 7 se muestra la variación de la temperatura ambiente exterior [ $T_{a,ex}$ ], la bandeja con producto [ $T_{a,B}$ ] y la irradiancia sobre superficie horizontal [ $I_{h,ex}$ ] en función del tiempo, para el secadero tipo Chimenea. Se advierte que para radiaciones entre  $940 - 990 \text{ Wm}^{-2}$  los niveles de temperaturas máximos que obtuvieron fueron de  $48,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $50,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si bien se tiene diferencia promedio de  $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$  respecto a la temperatura ambiente exterior, la humedad en el interior promedio del secadero fue  $37,7 \%$ , nivel razonable para este tipo de sistema de secado pasivo, sin fuerza impulsora externa. Además, es de tener en cuenta que como el secadero tiene cubiertas de plástico, resulta difícil evitar las infiltraciones de aire que producen una disminución de la temperatura del aire interior.

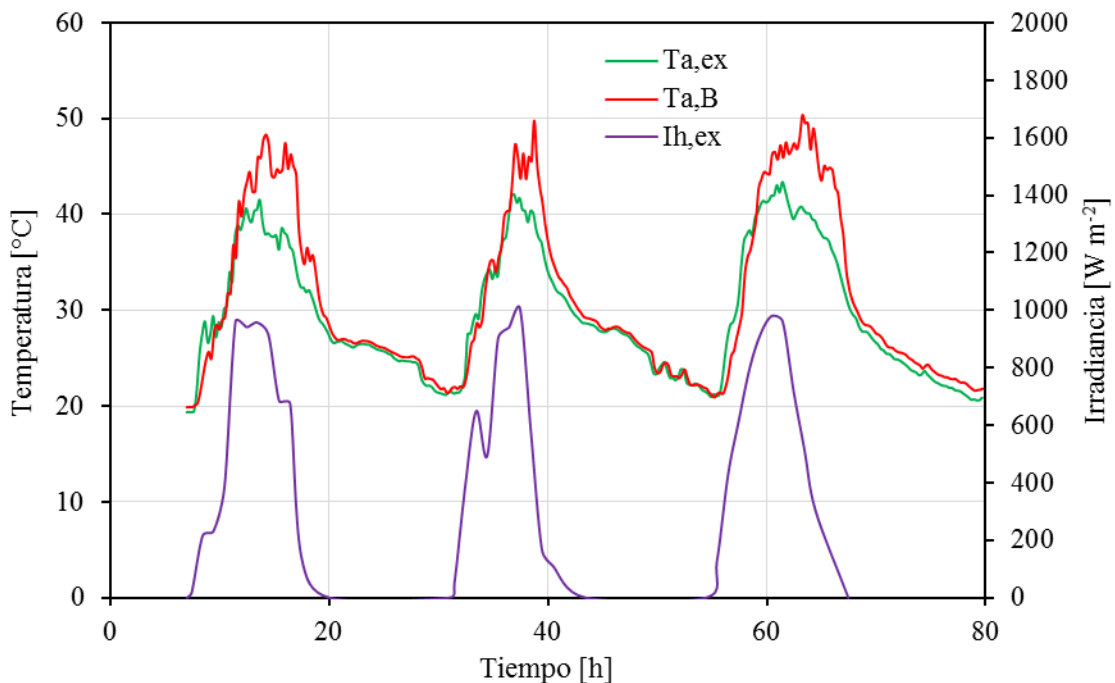


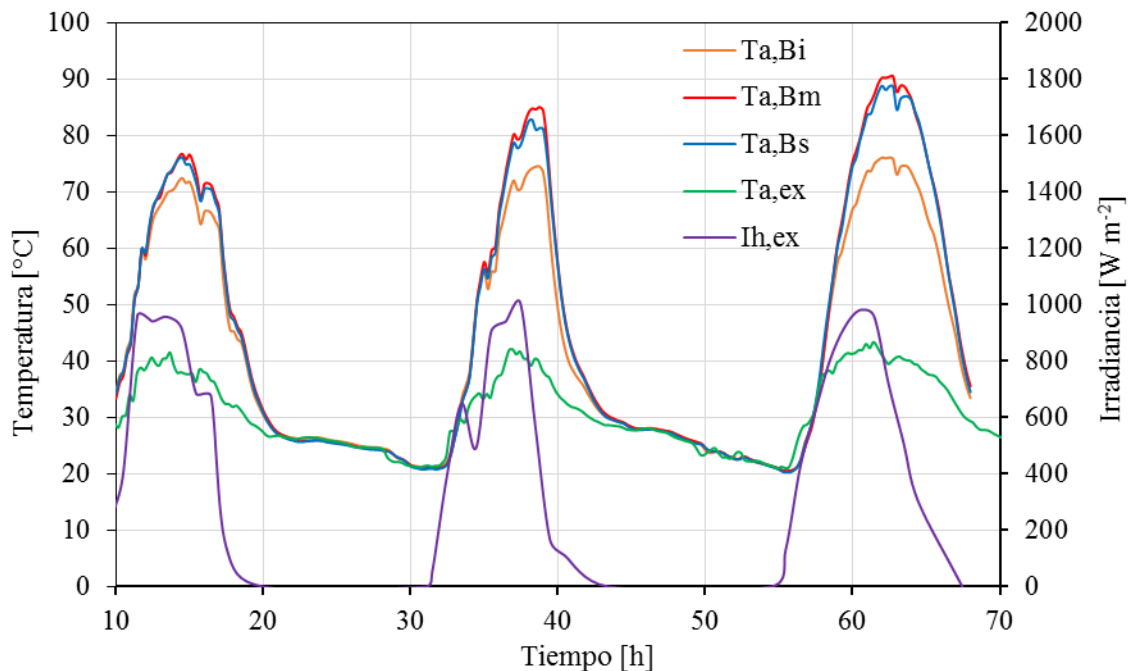
Figura 7. Variación de las temperaturas del aire en el interior del secadero, sobre la bandeja con producto, y del aire exterior. Irradiancia incidente exterior sobre plano horizontal

Como la circulación del aire es en convección natural, el secadero funciona por diferencia de densidad de aire entre la entrada y la salida, ocasionada por la diferencia de temperatura; cuanto más baja sea esta diferencia, menor es la circulación del aire, y menor la velocidad de secado.

La humedad del aire a la salida del colector, ingreso a la cámara de secado, donde están las bandejas fue en promedio de 49,9 %, 57,4 % y 37,9 % para cada uno de los días de secado, mientras que a la salida del secadero fueron 48,4 %, 47,1 % y 34,3 %.

#### • *Secadero Escalera*

En el caso del secadero escalera se realizaron las mediciones de temperaturas en cada una de las bandejas, identificadas como bandeja inferior [Ta,Bi], bandeja del medio [Ta,Bm] y bandeja superior [Ta,Bs]. Se incluyen la temperatura del aire exterior y la irradiancia sobre superficie horizontal. En la Fig. 8 se advierte un aumento importante de la temperatura en los diferentes niveles del secadero, variando según la ubicación, para el 1er. día desde 42,40 °C hasta 76,73 °C; 2do. día 43,50 °C a 82,71 °C y para el 3er. día de 44,20 °C a 88,70 °C; y con niveles de radiación entre 940 y 990 Wm<sup>-2</sup>. La temperatura máxima corresponde a la bandeja del medio, ligeramente mayor a la temperatura de la bandeja superior, entendiéndose que esta diferencia de 1 o 2 °C se debe a su proximidad con la entrada de la chimenea del secadero, donde se produce una contracción del área transversal de circulación y por lo tanto un aumento de la velocidad de circulación. Las temperaturas del aire a la entrada del secadero son similares a la temperatura del aire ambiente exterior.



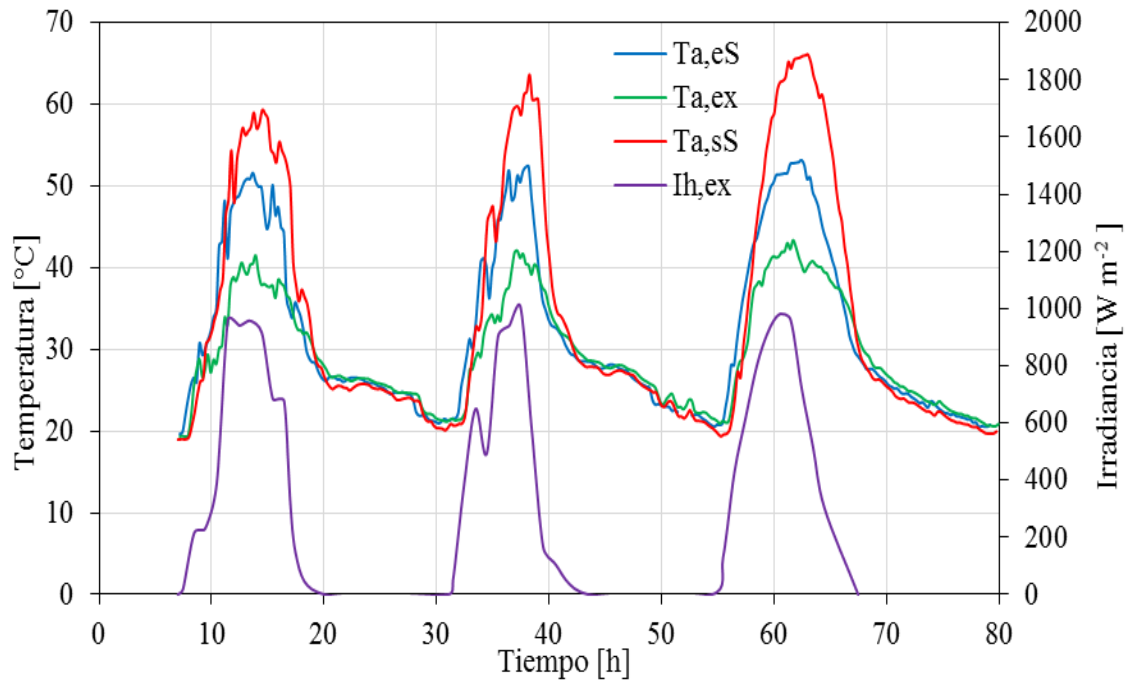
*Figura 8. Variación de las temperaturas del aire en el interior del secadero, sobre la tres bandeja con producto y del aire exterior. Irradiancia incidente exterior sobre plano horizontal*

La humedad promedio diaria del aire en el secadero fue 30,5 %, 26,9 % y 17,3 % para cada uno de los días de secado.

- ***Secadero Túnel***

Del análisis de los datos obtenidos en el sector del colector del secadero túnel se desprende que la temperatura del aire a la entrada del mismo, coincidente con la temperatura del aire ambiente exterior, se mantuvo a partir de las 11,4 h y hasta 16,2 h por encima de 40 °C y se tiene un valor máximo de 43,4 °C a las 13 h. En ese mismo intervalo la temperatura del aire a la salida del colector fue superior a 48 °C, con un máximo a las 15,5 h de 54,3 °C, siendo el valor promedio de 52 °C. La eficiencia máxima para el primer día de ensayo del colector, calculada teniendo en cuenta la energía útil sobre la energía incidente (Duffie y Beckman, 1991), fue de 53,3 % para un flujo de 0,51 kg s<sup>-1</sup>. La eficiencia promedio diaria del colector para el mismo día fue 38 %, mientras que para los 3 días de secado fue del 31,8 %.

En la Fig. 9 se aprecian las variaciones temporales de las temperaturas a la entrada ( $T_{a,eS}$ ), salida ( $T_{a,sS}$ ) del sector de secado, en contraste con la temperatura del aire en el ambiente exterior ( $T_{a,ex}$ ) y la irradiancia incidente sobre superficie horizontal ( $I_{h,ex}$ ) correspondiente a los tres días de secado. Se evidencia un aumento de la temperatura del aire al pasar por el sector de secado. La temperatura del aire a la salida del secadero se mantuvo, para el mismo intervalo, en valores superiores a 60 °C, con un valor máximo de 70,1 °C a las 14,8 h y con un valor promedio de 63 °C. Como se aprecia, para los tres días de secado, entre las 11h y las 18h las diferencias de temperatura entre el interior del secadero y el ambiente exterior fue igual o mayor a 10 °C, para asegurar que el secado sea efectivo (Augustus León *et al.*, 2002)



*Figura 9. Variación de temperatura en distintos puntos del secadero y la Irradiancia sobre superficie horizontal para tres días de ensayo en función del tiempo*

La humedad del aire exterior durante las horas de secado fue menor que 35,2 %, la mínima de 22 % (el último día) y el promedio durante el periodo de secado fueron de 44 %. La humedad mínima del aire a la salida del colector fue 24,6 %, 23,9 % y 16,2 % para cada uno de los días de secado, mientras que a la salida del secadero fueron 15,4 %, 13,3 % y 8,2 %.

En la tabla 2 se resumen las variables climáticas de los tres primeros días de ensayo, parámetros constructivos de los secaderos y datos del proceso de secado.



<b>PARAMETROS CLIMATICOS</b>	<b>Día 1</b>	<b>Día 2</b>	<b>Día 3</b>
Irradiación global sobre plano horizontal [MJ m <sup>-2</sup> ]	21,10	18,83	22,25
Temperatura ambiente promedio durante horas de secado [°C]	29,66	29,05	32,21
Temperatura ambiente promedio durante la noche [°C]	21,27	24,78	25,04
Humedad relativa aire promedio durante horas secado [%]	50,99	50,99	43,97
Humedad relativa aire promedio durante la noche [%]	77,93	65,97	60,77

<b>PARÁMETROS SECADERO</b>	<b>Escalera</b>	<b>Chimenea</b>	<b>Túnel</b>	<b>Microtúnel</b>
Cantidad de producto cargado [kg]	9,56	12,00	100	99,43
Densidad de carga [kg/m <sup>2</sup> de colección]	4,78	1,04	3,47	3,98
Superficie de colección [m <sup>2</sup> ]	2,00	11,50	28,80	25,00
Inclinación del colector [ °]	30,00	27	0	0
Superficie total de bandejas [m <sup>2</sup> ]	2,50	3,60	14,40	25,00
Flujo de aire [kg/s]	CN	CN	0,15	-
Porcentaje de humedad de la muestra [Peso(t)/Peso inicial] al 3er. día de secado (incluyendo la noche)	40 %	43%	27 %	53 %
Temperatura promedio del aire a la salida durante horas de secado [°C]				
Día 1°	59,31	37,37	43,87	s/d
Día 2°	51,64	35,55	42,47	s/d
Día 3°	62,69	40,92	50,79	s/d
HR promedio del aire a la salida [%]				
Día 1°	38,90	41,91	34,57	s/d
Día 2°	39,20	42,42	34,69	s/d
Día 3°	26,30	29,22	20,33	s/d
Temperatura máxima aire dentro secadero[°C ]	85,05	50,33	66,08	s/d
Calidad del producto	MB	MB	MB	B
Facilidad de carga / descarga (0-10)	7	9	9	6

Tabla N° 2: Características constructivas, datos climáticos y de secado de los distintos secaderos para los tres primeros días del ensayo

### ❖ *Cinética de secado*

En la Fig. 10 se grafica la relación de humedad (MR) en función del tiempo para los secaderos Chimenea, Escalera, Microtúnel y Túnel, todos para la variedad Yokavil.

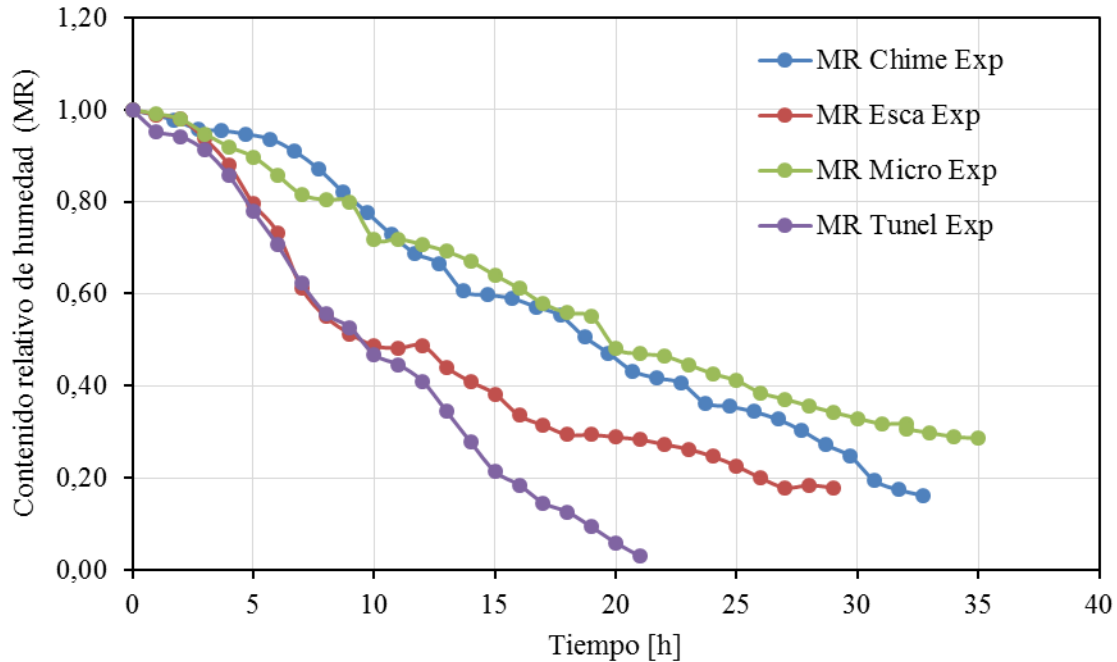


Figura 10. Contenido de humedad relativa en función del tiempo de secado

Después de 21 horas de secado, las muestras llegaron a los siguientes contenidos de humedad (bs):  $M_{Chime}$  0,87  $kg\ kg^{-1}$ ,  $M_{Escalera}$  0,73  $kg\ kg^{-1}$ ,  $M_{Microtúnel}$ , 0,31  $kg\ kg^{-1}$  y  $M_{Túnel}$  0,37  $kg\ kg^{-1}$ , lo que significan pérdidas de agua de un 58 %, 72 %, 53 % y 97% respectivamente. Esta diferencia se debe fundamentalmente a las características del proceso de secado, especialmente al tipo de fuerza impulsora del aire, convención forzada o natural, y en consecuencia a la velocidad y temperatura promedio del aire de secado.

Una vez finalizado el proceso los pimientos fueron retirados del secadero y acondicionados para lograr la homogeneización del producto respecto al contenido de humedad.

La cinética de secado expresada en términos de los modelos matemáticos de la tabla 1, se detallan en la tabla 3. Se muestran los solamente los modelos que mejor ajustan para cada tipo de secadero.

	R2	X <sup>2</sup>	RMSE	MBE	n	k	a	c
<b>Chimenea</b> <i>Page</i>	0,995	0,00044	0,02019	0,00071	1,633	0,006		
<b>Escalera</b> <i>Logarítmica</i>	0,983	0,00134161	0,03474834	0,00099		0,081	1,002	0,083
<b>Microtúnel</b> <i>Page</i>	0,995	0,00020319	0,01371653	0,00043444	1,278	0,015		
<b>Túnel</b> <i>Logarítmico</i>	0,993	0,000798	0,02625402	-4,545E-08		2,5904	0,0245	1,541

Tabla 3. Parámetros estadísticos obtenidos en el ajuste

Las ecuaciones de ajuste para la variedad Yokavil del contenido relativo de humedad, que se muestran en la Figura 10, usando el modelo de Page y Logarítmico, para cada secadero:

$$MR_{Chime} = \exp (-0,006*t^{1,633})$$

$$MR_{Micro} = \exp (-0,015*t^{1,278})$$

$$MR_{Esca} = 1,002 \exp (-0,081*t) + 0,083$$

$$MR_{Túnel} = 0,0245 \exp (-2,5904*t) + 1,541$$

Las velocidades de secado de la variedad Yokavil, en función del contenido de humedad y del tiempo, en los secaderos construido en la EEA Chilecito, se detallan en la Fig. 11 y Fig.12, respectivamente. Las ecuaciones que corresponden a cada curva fueron ajustadas por cuadrados mínimos. En la Fig. 11 se advierte que la velocidad de secado (Vs) en función del contenido de humedad es mucho mayor para el secadero escalera al iniciar el proceso de secado; esto se debe a que los niveles de temperatura son muy elevados y como se trata de un sistema en convección natural la velocidad del aire es muy alta; consecuentemente, la extracción de agua superficial es muy rápida. En el secadero túnel la variación es más moderada y si bien su variación es logarítmica, tabla 4, su pendiente varía más lentamente. De las curvas correspondientes a los secaderos Chimenea y Microtúnel se aprecia que la velocidad de secado tiene poca variación.

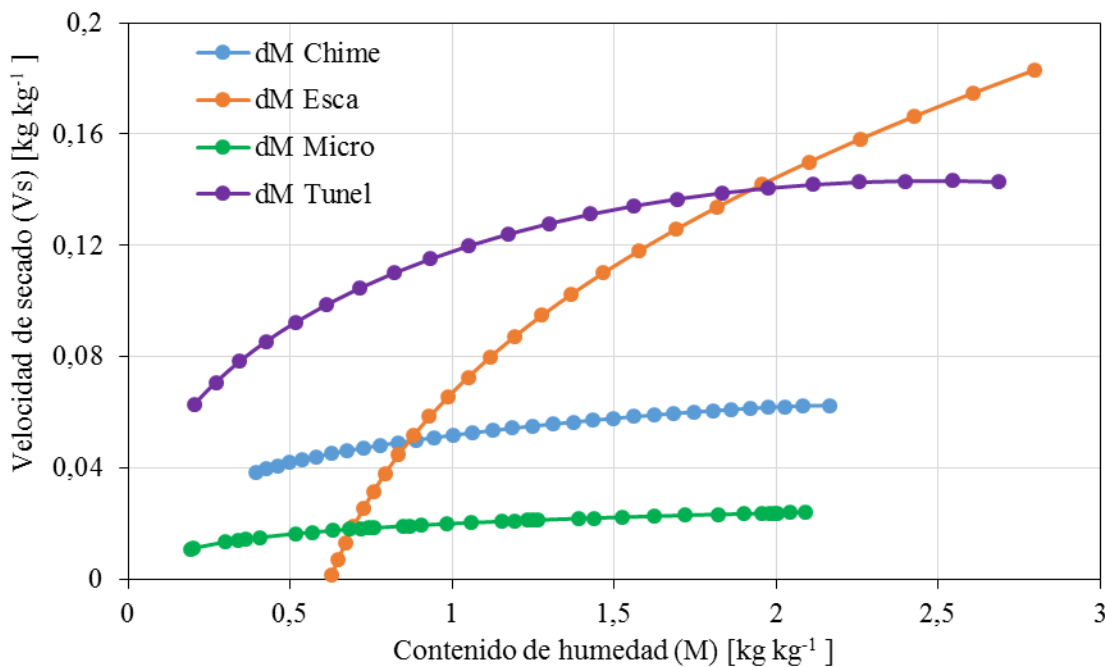


Figura 11. Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad

Se destaca que cada secadero tiene una temperatura promedio de trabajo que influye en la velocidad de secado. En la figura 12 se muestra la variación de la velocidad de secado en función del tiempo. En el caso del secadero túnel

no es lineal sino una función cuadrática decreciente del tiempo; el resto ajusta adecuadamente mediante rectas con pendientes negativas.

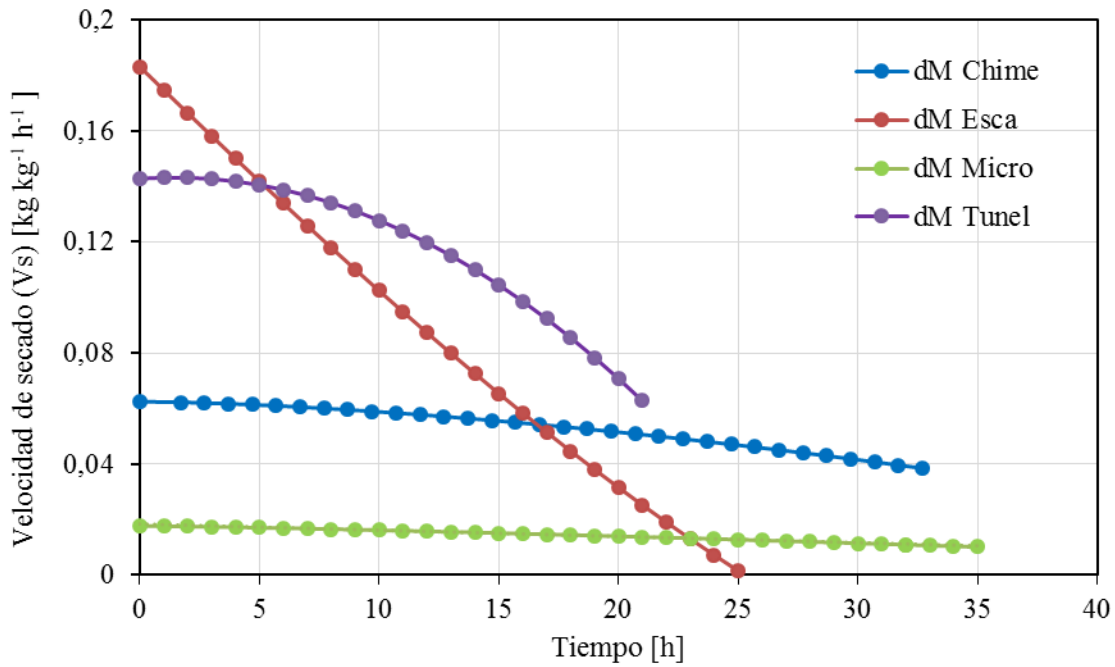


Figura 12. Variación temporal del contenido de humedad (bs)

$V_{SChim} = 0,0144 \ln(M_{Chime}) + 0,0519 \quad R^2 = 0,9996$	$V_{SChim} = -0,0008 t + 0,0656 \quad R^2 = 0,9722$
$V_{SEsca} = 0,118 \ln(M_{Esca}) + 0,0637 \quad R^2 = 0,9976$	$V_{SEsca} = -0,0073 t + 0,1781 \quad R^2 = 0,9973$
$V_{SMicro} = -0,0059 \ln(M_{Micro}) + 0,0203 \quad R^2 = 0,9985$	$V_{SMicro} = -0,0002 t + 0,0183 \quad R^2 = 0,9924$
$V_{STúnel} = 0,0337 \ln(M_{Túnel}) + 0,1162 \quad R^2 = 0,9903$	$V_{STúnel} = -0,0002 t^2 + 0,0006 t + 0,142 \quad R^2 = 0,998$

Tabla N° 4. Ecuaciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad y del tiempo

En la Tabla 5 se muestra para cada secadero ensayado el tiempo de secado total (ts), contenido de humedad (M), relación de humedad relativa (MR), y velocidades de secado (Vs) máxima, mínima y media.

	<b>ts</b>	<b>M</b>	<b>MR</b>	<b>Vs max</b>	<b>Vs min</b>	<b>Vs media</b>
Chimenea	32	0,34	0,16	0,062	0,038	0,053
Escalera	26	0,40	0,15	0,183	0,002	0,088
Microtúnel	35	0,16	0,25	0,018	0,010	0,014
Túnel	21	0,07	0,03	0,15	0,062	0,12

Tabla N° 5. Síntesis de los parámetros de secado

La Fig. 13 (a) y (b) muestra el pimiento cargado en el secadero chimenea y en el escalera; mientras que la Fig.14 (a) y (b) las cargas en el secadero Microtúnel y túnel.



Fig. 13. Vista de bandejas con pimiento para pimentón secado: a) Chimenea; b) Escalera



Fig. 14. Vista de secaderos tendaleros con producto cargado: a) Microtúnel; b) Túnel

#### ❖ *Jornadas*

##### *a. Instancia técnicos de INTA – Productores*

Durante esta jornada se trabajó con los productores de la zona. Se abordaron los siguientes temas: la demanda acerca de la calidad del pimentón en la zona Oeste de la Rioja para cumplir con los requerimientos del Código Alimentario Argentino C.A.A. (color, pungencia, fibra, etc.) y el rendimientos en peso seco/ha de las variedades Encalilla, Yokavil, Lautaro y Experimental “D” que se cultivan en la región. Respecto al primero de los temas se detectó que el manejo de secado del pimiento para pimentón es inadecuado, con presencia de sustancias no permitidas como ser polvo, insectos etc.

Fecha de recepción:16/02/2016

Fecha de aceptación: 30/05/2016

**b. Instancia técnicos de INTA – Técnicos de GERCA**

En esta reunión se puso en común la forma de trabajo con los productores para mejorar todo lo referido a siembra y cosecha del pimiento pimentonero y se destacó la necesidad de mejorar el proceso de secado a fin de obtener un producto seco de mejor calidad. Surgió entonces la idea de construir los secaderos solares que se explican en la metodología, dentro del predio de la EEA Chilecito de tal forma que los productores pudieran tener acceso directo a la información sobre nuevas técnicas de secado solar y utilizar los equipos allí construidos.

**c. Instancia Técnicos de GERCA - productores**

Durante la jornada de secado, Fig. 15, en horas de la mañana, se realizó una reunión con los productores donde compartieron sus experiencias de secado del pimiento y se presentaron los distintos secaderos solares que se construyeron en la Estación Experimental. Posteriormente, durante la tarde, se invitó a los productores a cargar los distintos equipos con sus productos. Participaron de la misma quince productores.



*Figura 15. Jornada de presentación de equipos solares*

Fecha de recepción:16/02/2016

Fecha de aceptación: 30/05/2016

Una vez finalizado el proceso de secado se reunió nuevamente a los productores y se procedió a analizar las curvas de secado de la variedad Yokavil.

En base a las curvas de secado y a los diseños de los secaderos, se analizaron las ventajas y desventajas de cada sistema y los productores pudieron comparar su “metodología de secado” con los resultados obtenidos en los sistemas solares propuestos.

## **CONCLUSIONES**

Los secaderos solares en convección natural ensayados tipo Chimenea y Escalera son de bajo costo y permiten obtener un producto de buena calidad en un tiempo mucho menor a los obtenidos en canchones al aire libre o sobre tendalero.

Las velocidades de secado entre ambos secaderos son muy diferentes debido fundamentalmente a las características térmicas de los materiales utilizados para su construcción (aislaciones) y a la estanqueidad en el colector y en la cámara de secado. Esto es importante porque determina el nivel de infiltraciones de aire dentro del sistema, factor que influye en la velocidad de circulación de aire. En este sentido, existe una gran diferencia en las velocidades de secado entre los secaderos en convección natural ensayados y esto se ve reflejado en el tiempo de secado.

En cuanto al secadero túnel con circulación forzada la velocidad de secado disminuye con el tiempo en forma cuadrática negativa, lo que indica un secado inicialmente rápido y con menor tiempo. También en este caso la construcción es sencilla, de un costo razonable, realizable con mano de obra local y materiales que se usan en la vida cotidiana. Puede ser con estructura de hierro o madera.

Los modelos teóricos adoptados para describir la cinética de secado de los cuatro secaderos son los ajustados con el menor error.

La planilla de comparación del comportamiento de cada uno para determinadas condiciones climáticas y la cinética de secado constituyen una herramienta muy útil a la hora de evaluar su comportamiento y del diseño de estos secaderos en otras latitudes.

## **BIBLIOGRAFIA**

Augustus Leon S., Kumar M., Bhattacharya S. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pergamon. Vol. 6, pag. 367–393.



Bala B. & J.Woods, (1989), Simulation and Optimization of natural convection solar drier, Journal of Agricultural Engineering. Vol. 27, pp. 419-424.

Belmonte S., Garrido S., Escalante K., Barros M.V. y J. Mitchell, (2014), Reflexiones y propuestas para mejorar procesos de adecuación socio-técnica y políticas públicas de energías renovables. Talleres participativos ASADES 2012-2013, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 18, pp.12.01-12.08.

Bistoni S., Iriarte A., Pereyra A., Kiskía M., Lesino G., y V. Javi, (2010), Construcción de una metodología para transferencia de tecnologías en energías renovables. Un aporte desde experiencias comunitarias urbanas y rurales, Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 25 pp 47-55.

Bistoni S., Villafañez A., Furque V., Torchan S., Luna R., Iriarte A., Luque V. y .V. García, (2012), Secadero solar tipo gabinete con estantes escalonados, CD, Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA, CODINOA.

Carabajal D., (2002), Secadero tendalero con cubierta plástica. Folletos de divulgación de INTA Catamarca.

Chemes J., Arelovich L., Arraña I y P. Bertinat, (2014) ¿Que es bueno y que es mejor? Metodologías de análisis para la evaluación de implementaciones tecnológicas, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 18, pp.12.19-12.28.

Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición, Wiley Interscience, New York.

Espinoza R y Saravia L. (2010), Secado solar de productos agroalimentarios en Iberoamérica. Ed. CYTED.

Iriarte A., Bistoni S., Luque V., Lara M. y L. Brizuela, (2010), Secadero tendalero con chimenea solar, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, pp 02.01- 02.08.

Jairaj K., Singh S. & K. Srikant, (2009), A review of solar dryers developed for grape drying, Solar Energy Vol 83, pp. 1698-1712.

Kavak Akpınar E y Y. Bicer, (2008), Modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun, Energy Conversion and Management, Vol. 49, pp 1367- 1375.



Sosa R., Buenanueva F., Quiroga N. y A. Esteves, (2014), Transferencia de tecnología solar para cocción de alimentos en comunidad rural de oasis. Caso de El Pastal, Las Heras, Mendoza, Actas de la XXXVII Reunión de la Asociación Argentina de Energías renovables y Ambiente, Vol. 2, pp. 12.11-12.16, Oberá, Misiones.

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 Vol.65, pp.413-425.

Tunde - Akintunde T.Y (2011), Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper, Renewable Energy, Vol. 36, pp. 2139-2145.