

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SECADO SOLAR Y CONSTANTE EN LABORATORIO Y A CAMPO DE ESPINACA

Ezequiel Ansaldi<sup>1</sup>, Federico Flores<sup>1</sup>, Miguel Ángel Lara<sup>2</sup>  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR)  
Laboratorio de Energías Alternativas (IFIR - CONICET)

E-mail: [ansaldiezequiel@gmail.com](mailto:ansaldiezequiel@gmail.com) / [fgflores87@gmail.com](mailto:fgflores87@gmail.com) / [malara@fceia.unr.edu.ar](mailto:malara@fceia.unr.edu.ar)

Tel.: (0341) 4802649 /52 | Av. Pellegrini 250 | 2000 Rosario

**RESUMEN:** El objetivo del presente trabajo es evaluar la operación de secado de espinaca bajo dos dispositivos diferentes: un secadero solar a campo y un secadero de laboratorio en el que se simula el ciclo solar. Además se comparan las curvas de secado de espinaca en laboratorio a temperatura constante y simulando un ciclo solar. Para tal fin, se realizaron numerosas experiencias en laboratorio con velocidades de aire constantes y a diferentes temperaturas. También se realizaron ensayos de secado en campo, en un deshidratador solar de uso agrícola para pequeños productores. Como resultados más importantes, se determinó que la temperatura a la cual se da la mayor velocidad de secado es de 50°C con una carga del producto de 5kg/m<sup>2</sup> y tiempos de secado de entre 8 y 10 horas en régimen constante y de 16 horas en ciclos solares. Además se demostró el comportamiento similar entre las curvas de secado obtenidas en laboratorio y en campo mediante el modelo matemático de Page.

**Palabras claves:** secado, espinaca, laboratorio, a campo.

### INTRODUCCIÓN

El secado tiene por finalidad aumentar la duración de conservación del producto mediante la eliminación de parte del agua contenida en el mismo, lo que se consigue pasando aire sobre el material a temperaturas mayores que la ambiente. La pérdida de agua resultante se traduce siempre en modificaciones en la calidad: aspecto, textura, gusto, composición nutritiva. (Espinoza, 2010). Estas modificaciones de los vegetales pueden estar determinadas por agentes biológicos, los microbios y las enzimas o diastasas; asimismo los agentes químicos, como el oxígeno y el agua, y los físicos como el calor y la luz. De todos ellos los más perjudiciales son los biológicos, los cuales son potenciados por la presencia de agua en el producto (Raschieri, 1955). Por esto es preciso determinar con exactitud la temperatura óptima de deshidratación, así como el tiempo de duración del proceso de secado hasta lograr la humedad deseada.

Si bien hay varios ensayos de deshidratación de productos que se realizaron en distintas zonas del país, ninguno fue realizado en la zona de la Pampa Húmeda en épocas invernales, con escasas precipitaciones y temperaturas que no superan los 20° C. Nuestro principal objetivo es poder demostrar que a pesar de estas condiciones poco favorables para el secado solar, la energía solar puede ser utilizada como una fuente alternativa y/o complementaria para realizar el proceso de deshidratación del producto, que en nuestro caso es la espinaca (Espinoza, 2010).

La finalidad de realizar varias experiencias a temperatura constante en laboratorio es poder evaluar y determinar los parámetros más adecuados para nuestras variables (temperatura, tiempo, carga de producto y velocidad del aire), con los equipos y condiciones de ensayo que se detallarán en la siguiente sección del trabajo. Luego se realiza la simulación de un ciclo solar en laboratorio y en campo para estudiar el comportamiento en ambos casos.

En el trabajo se muestra el diseño de un deshidratador solar destinado para pequeños productores y de bajos costos de producción.

### MATERIALES Y METODOS

#### - MATERIA PRIMA UTILIZADA EN LAS EXPERIENCIAS

En este trabajo, seleccionamos como producto a secar espinaca fresca (*spinacea oleracea*) de producción local. Los trabajos de investigación se llevaron a cabo en la ciudad de Rosario (latitud 33° 1' 60S, longitud 60° 37' 60E, 24m sobre el nivel del mar), ubicada en la provincia de Santa Fe al centro del país. La espinaca proviene de la zona rural de General Lagos a unos 20 km de la ciudad de Rosario. Las épocas de cosecha y producción de este producto son desde mediados de mayo hasta mediados de septiembre, donde el clima está caracterizado por baja humedad en el ambiente, escasas precipitaciones (35 mm por mes en promedio) y bajas temperaturas (oscilan en promedio entre los 2°C y los 18°C, con picos de grados bajo cero), evitando que al producto se le quemem las hojas por mucho frío o se pudra por exceso de calor. El rendimiento aproximado por hectárea está entre 15 y 17 toneladas. Los precios a nivel mayorista oscilan entre \$1,50 y \$3 por kg condicionados y determinados principalmente por la oferta y demanda que exista en el mercado.

<sup>1</sup> Estudiante Avanzado de Ingeniería Industrial

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

A lo que respecta a este trabajo en sí, el producto fresco tiene una merma aproximada de un 35% con la finalidad de poder secarla y obtener un producto de calidad. Esto es debido a que solo se utilizan las hojas descartando todo el tallo y tronco de la planta. La desecación reduce grandemente el peso de los vegetales, en donde el peso seco llega a un 10% del peso húmedo del material. Esta enorme diferencia de peso, y la posibilidad de conservación, son los dos determinantes principales que pueden aconsejar una desecación industrial en zonas de gran producción, con objeto de economizar en los gastos de transporte y evitar la baja de precios en las temporadas de recolección (Friedrich, 1976).

- **DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS**

A) En laboratorio

En la Figura 1 se muestra un esquema del túnel de secado a escala de laboratorio. El mismo consiste en un ventilador centrífugo, un sistema de calefacción de aire por resistencias eléctricas, una antecámara de homogeneización del aire y la cámara donde se coloca el producto a secar.

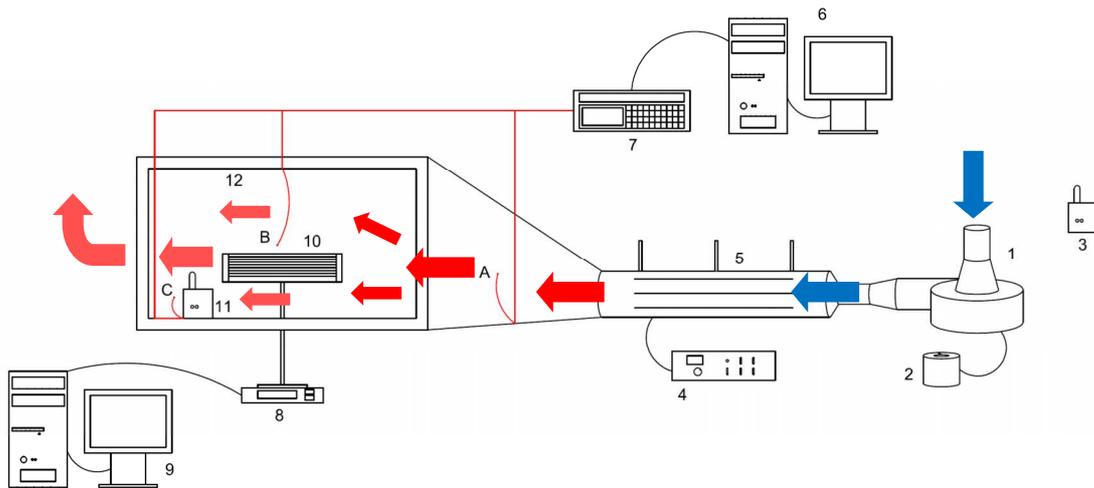


Figura 1 Esquema del túnel de secado con los dispositivos periféricos utilizados. Referencias: 1-Ventilador centrífugo. 2-Reóstato. 3-Medidor de humedad ambiental. 4-Selector de temperaturas. 5-Calentador de aire. 6-Computadora con software para toma de datos. 7-Dispositivo para toma de datos de termocuplas. 8-Balanza. 9-Computadora con software para toma de datos. 10-Bandeja para colocar el producto a secar. 11-Medidor de humedad interior. 12- Cámara de Secado. A, B y C-Termocuplas.



Figura 2 Cámara de secado, bandeja con el producto a secar y termocuplas.



Figura 3 Ventilador centrífugo, selector de temperaturas y calentador de aire por resistencias.

El ventilador centrífugo está conectado a un reóstato, de manera de poder variar la tensión de alimentación, generando distintos caudales de aire. En las experiencias realizadas, la tensión de alimentación siempre se mantuvo constante, para lograr aproximadamente el mismo caudal de aire. El ventilador está acoplado al sistema de calefacción utilizando un material anti vibratorio, evitando perturbaciones al registro de datos del peso del producto en la balanza.

El sistema de calefacción de aire consiste en un tubo de 100 cm de largo, aislado térmicamente con el exterior por fibra de cemento. El mismo contiene resistencias eléctricas conectadas a un dispositivo de regulación electrónica que cumple la función de controlar la corriente que circula por ellas, permitiendo calentar el aire a distintas temperaturas, ya sea de manera constante o simulando un ciclo solar, en el cual la temperatura varía de acuerdo al momento del día (ciclo de 12 horas de sol).

El túnel de secado consiste en una antecámara de homogeneización del aire y una cámara de secado, ambas de sección rectangular. En la cámara de secado el aire debe circular en forma totalmente uniforme y a velocidad constante durante toda la experiencia para obtener los resultados más precisos posibles. El interior de ambas cámaras está revestido con telgopor de 3 cm de espesor, de manera de aislarlas térmicamente del exterior.

El producto a deshidratar se colocó en una bandeja de estructura de aluminio de 25 cm de ancho, 30 cm de largo y 5 cm de altura, permitiendo que el aire circule uniformemente, a través de las paredes y base construidas en alambre fino. La bandeja fue colocada por medio de una varilla roscada soldada a una base rectangular metálica, sobre una balanza electrónica de alta precisión (Precisa 500 M-2000 C, con apreciación de 0,001 g y capacidad máxima de 2 kg), con salida de interfase V24/SR232 bidireccional a una PC con el software Rs Multi v1.0. Esto nos permitió registrar la pérdida de masa del producto a través del tiempo, evidenciando la pérdida de masa de agua.

Para poder obtener información acerca de las condiciones de operación del proceso se colocaron termocuplas (Tipo T norma NBS) en diferentes partes del túnel, como se muestra en la figura 1, y registradores electrónicos de temperatura y humedad (Novus LogBox RHT, con apreciación 0,1 °C y 0,1% H y rango de operación -40 a 70 °C y 0 a 100% H), colocados uno en el interior de la cámara de secado y el otro en el exterior, cerca de la entrada de aire al ventilador. La velocidad del aire fue medida a través de un anemómetro de veleta.

Las termocuplas fueron conectadas a un datalogger (Fluke 2285 B), el cual se programó de manera de poder obtener mediciones en un intervalo de tiempo constante de 10 minutos, con una precisión de 0,1 °C. Los datos fueron almacenados directamente a una PC (Intel 386). En el caso de los registradores electrónicos de temperatura y humedad, los datos se almacenaron directamente en los mismos dispositivos, para luego ser leídos por el software Log Chart II, a través de un sensor infrarrojo con conexión USB 2.0.

B) A campo

En la figura número 4 se muestra un esquema del deshidratador solar a campo. El mismo consiste en un colector solar de matriz porosa, un ventilador axial, y un recipiente metálico que funciona como cámara de secado.

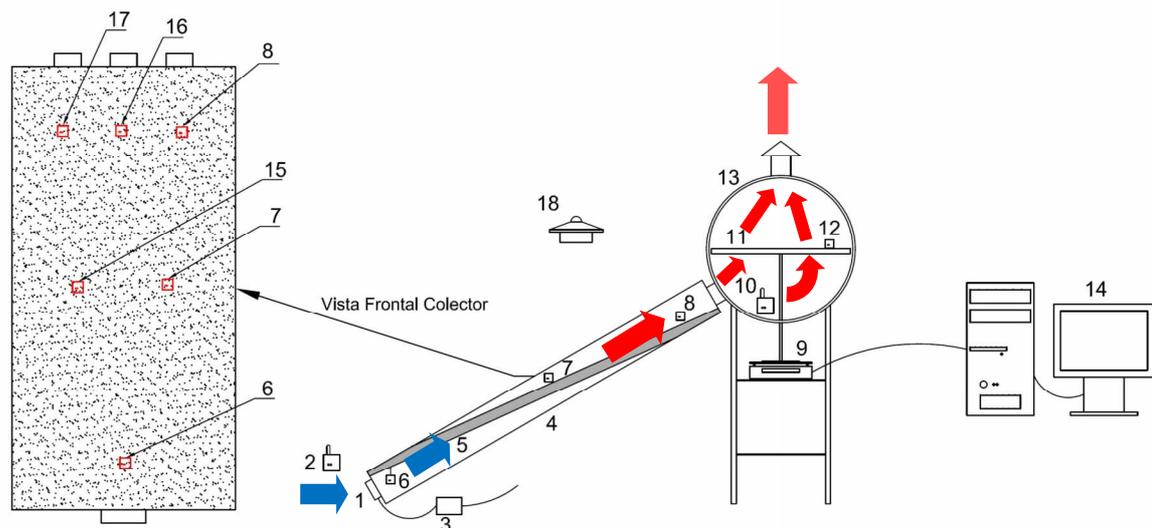


Figura 4 Esquema del deshidratador solar y los dispositivos periféricos utilizados. Referencias: 1-Ventilador axial. 2-Medidor de humedad y temperatura ambiente. 3-Transformador 220V-12V. 4-Colector solar. 5-Matriz porosa. 6-Medidor de temperatura n°18. 7-Medidor de temperatura n°38. 8-Medidor de temperatura n°32. 9-Balanza. 10-Medidor de humedad y temperatura interior. 11-Bandeja. 12-Medidor de temperatura n°45. 13-Cámara de secado. 14-Computadora con software para registro de datos de la balanza. 15-Medidor de temperatura n°17. 16-Medidor de temperatura n°31. 17-Medidor de temperatura n°44. 18-Solarímetro.



Figura 5 Vista lateral del deshidratador solar.



Figura 6 Cámara de secado y bandeja con el producto a secar.



Figura 7 Acoplamiento del ventilador axial

El ventilador utilizado es de tipo axial (12V) alimentado con un transformador 220V-12V, el cual funciona a velocidad constante introduciendo aire a temperatura ambiente desde el exterior hacia el interior del colector solar. El mismo está acoplado a la entrada del colector solar, como se muestra en la Figura 7.

El colector está formado por una cubeta de sección rectangular de 190cm de largo x 100cm de ancho x 20cm de profundidad, fabricada en fibra de vidrio y recubierta con una membrana de poliestireno. La misma cumple las funciones de aislante térmico y reflectante de la luz solar gracias a una delgada capa de aluminio superficial. La cubeta posee un orificio de entrada y tres de salida de aire de 10cm de diámetro como se aprecia en la figura 2. La matriz porosa se encuentra ubicada diagonalmente en el interior de la cubeta, está formada por un bastidor rectangular de caño metálico cuyas medidas son 195cm de largo x 95cm de ancho x 5 cm de alto. En ambas caras se colocó un tejido de alambre metálico para sostener el material poroso (viruta de hierro). Toda la matriz porosa se pintó de color negro mate para maximizar la captación de luz solar. Dada la baja velocidad del aire de entrada que atraviesa la matriz porosa y la utilización de viruta previamente seleccionada para tal fin, no se generaron partículas pequeñas que pudiesen contaminar al producto y por lo tanto no fue necesaria la incorporación de algún filtro de aire. Para tapar la cubeta se utilizó una plancha de policarbonato transparente de 0,4cm de espesor.

La cámara de secado es un recipiente cilíndrico metálico de 58cm de diámetro y 88cm de ancho. Está revestido interiormente con la misma membrana que se utilizó para revestir la cubeta. Posee 6 orificios de 10cm de diámetro, 3 en la parte superior que permiten la salida de aire húmedo y 3 en la parte media inferior que permiten el ingreso del aire caliente desde el colector. El colector está unido a la cámara de secado formando un ángulo de 32° con el nivel del suelo.

En el interior de la cámara de secado se colocó una bandeja de estructura de aluminio de 52cm de largo x 78cm de ancho x 2,5cm de alto con una base formada de malla plástica de sección cuadrada de 0,1cm. La misma se utilizó como recipiente contenedor del producto a deshidratar. La bandeja fue colocada por medio de una varilla roscada de 65cm de largo x 0,95cm de sección, soldada a una base rectangular metálica de 20cm de largo x 10 cm de ancho x 0,32cm de espesor, sobre una balanza electrónica (Kretz Single 3200C, con apreciación de 1g y capacidad máxima de 6 kg), con salida de interfase SR232/USB 2.0 a una notebook con el software codificado especialmente para la toma de datos con interfaz MS-DOS. Esto nos permitió registrar la pérdida de masa del producto a través del tiempo, evidenciando la pérdida de masa de agua.

Para poder obtener información acerca de las condiciones de operación del proceso se colocaron registradores electrónicos de temperatura (Novus TagTemp, con apreciación 0,1°C y rango de operación -40 a 70°C), colocados 6 en el interior del colector solar como se muestra en la figura 2 y 1 sobre la bandeja. Además se colocaron 1 registrador electrónico de temperatura y humedad (Novus LogBox RHT, con apreciación 0,1 °C y 0,1% H y rango de operación -40 a 70 °C y 0 a 100%H) en el interior de la cámara de secado y otro en el exterior a 20cm de la entrada de aire al colector. Los datos fueron almacenados directamente en los mismos dispositivos, para luego ser leídos por el software Log Chart II, a través de un sensor infrarrojo con conexión USB 2.0. Además, se utilizó un solarímetro del tipo Kipp para obtener medidas de la radiación solar durante los días en que se realizaron las experiencias.

Todos los datos obtenidos de las experiencias fueron analizados mediante el software OriginPro 8 SR4.

## **EXPERIENCIAS REALIZADAS**

En primer lugar se realizaron 3 experiencias preliminares en el laboratorio, con el objetivo poner a punto el equipo y determinar las condiciones de operación adecuadas para realizar las experiencias posteriores. Como resultado importante, se logró establecer la velocidad del flujo del aire, la ubicación de las termocuplas y la forma de presentar el producto. Con respecto a este último punto, se determinó que debe colocarse una carga máxima de 6 kg/m<sup>2</sup>, y el producto debe ser cortado en tiras transversales de 2 cm de ancho, para lograr que durante el secado las mismas se encojan y permitan un mayor flujo de aire hacia el interior de la bandeja contenedora, evitando que quede producto húmedo. Además, se determinó que se deben cortar los tallos de las hojas, porque luego del proceso de secado pierden la coloración característica de la espinaca.

Con respecto a las experiencias realizadas a campo, también se realizó una experiencia previa para poner a punto el equipo y determinar las condiciones de operación adecuadas para realizar las experiencias posteriores. Como resultado importante se determinó la necesidad de utilizar un ventilador de menor caudal que el utilizado en laboratorio. Esto debió ser así porque la experiencia de campo se realizó durante días de muy baja temperatura y alta velocidad del viento, con lo cual el ventilador introducía un caudal muy elevado de aire frío en el colector, impidiendo el correcto secado del producto. Se decidió utilizar un ventilador axial de 12 V, porque la utilización del reóstato para disminuir el flujo de aire, implicaba disminuir demasiado el voltaje peligrando el correcto funcionamiento y posible rotura del ventilador utilizado en el laboratorio. Además, por las condiciones climáticas antes citadas, se decidió aumentar la densidad de la matriz porosa (agregando más viruta de hierro para tener más superficie de contacto) y aislar el interior de la cámara de secado evitando pérdida de calor por las paredes de la misma.

### Experiencia 1: Laboratorio

Se colocaron dentro del recipiente 498,88 g de producto, lo que equivale a una relación de carga de  $6,65 \text{ kg/m}^2$ . La temperatura se seteó para obtener  $55^\circ\text{C}$  a la entrada de la cámara de secado. La velocidad de entrada del aire (antes del ventilador) fue de  $4,7 \text{ m/s}$  y la de salida (sobre el recipiente con producto)  $0,4 \text{ m/s}$ .

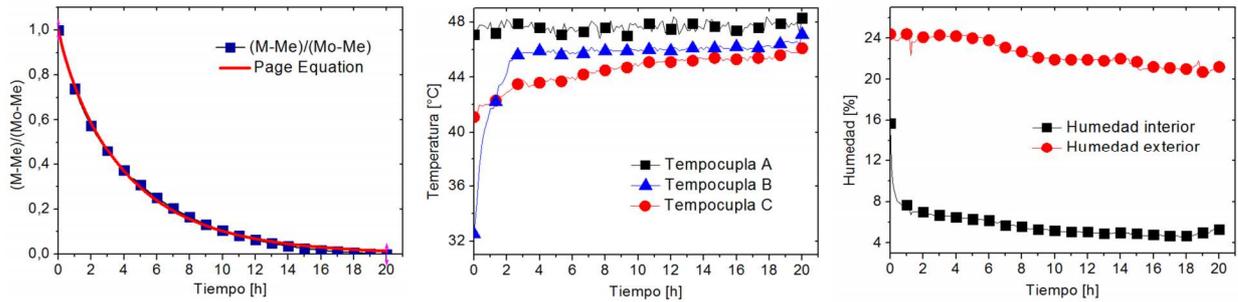


Gráfico 1: Evoluciones de (i) Pérdida de masa, (ii) Temperatura, (iii) Humedades

### Experiencia 2: Laboratorio

Para esta experiencia se colocaron 518,62g de espinaca fresca, lo que equivale a una relación de carga de  $6,91 \text{ kg/m}^2$ . La temperatura se seteó para obtener  $50^\circ \text{C}$  a la entrada de la cámara de secado. La velocidad de entrada del aire (antes del ventilador) fue de  $5,1 \text{ m/s}$  y la de salida (sobre el recipiente con producto)  $0,44 \text{ m/s}$ .

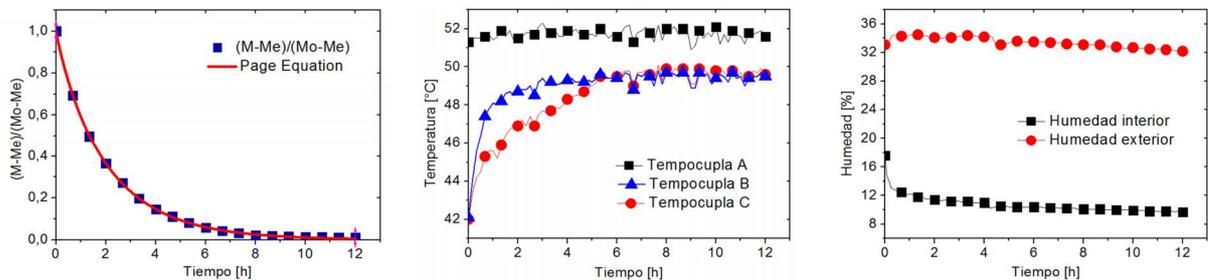


Gráfico 2: Evoluciones de (i) Pérdida de masa, (ii) Temperatura, (iii) Humedades

### Experiencia 3: Laboratorio

Dentro del recipiente se colocaron 482,63g de producto, lo que equivale a una relación de carga de  $6,44 \text{ kg/m}^2$ . La temperatura se seteó a  $45^\circ \text{C}$  a la entrada de la cámara de secado. La velocidad de entrada del aire (antes del ventilador) fue de  $4,9 \text{ m/s}$  y la de salida (sobre el recipiente con producto)  $0,42 \text{ m/s}$ .

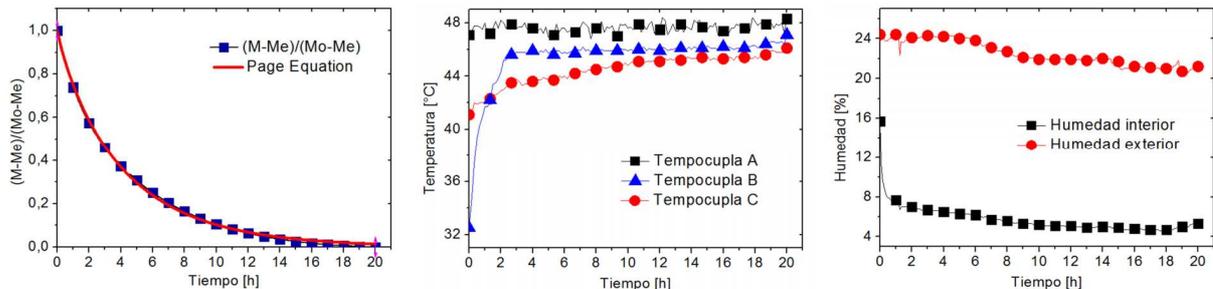


Gráfico 3: Evoluciones de (i) Pérdida de masa, (ii) Temperatura, (iii) Humedades

### Experiencia 4: Laboratorio

Dentro del recipiente se colocaron 357,65g de producto, lo que equivale a una relación de carga de  $4,77 \text{ kg/m}^2$ . La temperatura se seteó en régimen Solar 2, comenzando con una temperatura de  $23^\circ \text{C}$  al inicio del ciclo solar. Para simular 2 días de secado solar, tanto el ventilador como el calentador de aire se conectaron a un timer electrónico, que fue configurado para cerrar el circuito y dejar pasar la corriente durante 12 horas diarias (de las 8 de la mañana a las 8 de la noche) para luego cortar la corriente por las siguientes 12 horas (de las 8 de la noche a las 8 de la mañana). La velocidad de entrada del aire (antes del ventilador) fue de  $4,9 \text{ m/s}$  y la de salida (sobre el recipiente con producto)  $0,43 \text{ m/s}$ .

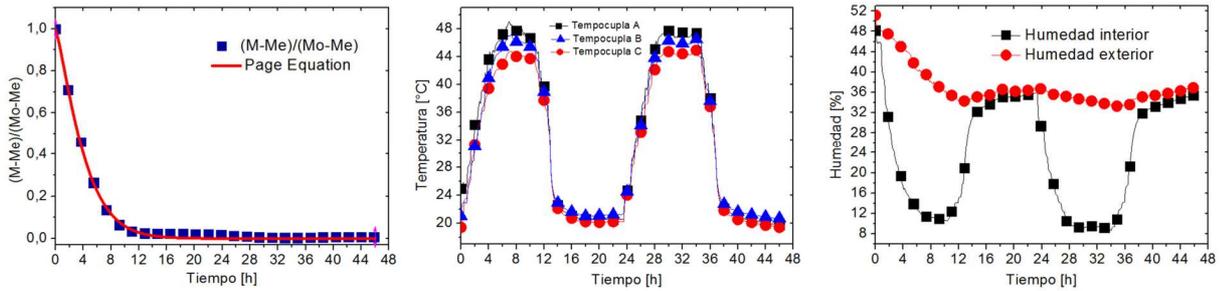


Gráfico 4: Evoluciones de (i) Pérdida de masa, (ii) Temperatura, (iii) Humedades

### Experiencia 5: Laboratorio

Dentro del recipiente se colocaron 396,81 g de producto, lo que equivale a una relación de carga de  $5,29 \text{ kg/m}^2$ . La temperatura se seteó en régimen Solar 2, comenzando con una temperatura de  $23^\circ \text{C}$  al inicio del ciclo solar. En esta experiencia, a diferencia de la anterior, solo se conectó el calentador de aire al timer, dejando el ventilador conectado directamente a la red eléctrica. De esta manera, el ventilador se mantuvo funcionando durante toda la experiencia, mientras que el calentador de aire solo se dejó funcionando durante 12 horas diarias, simulando el ciclo solar. Este proceso se repitió 2 veces. La velocidad de entrada del aire (antes del ventilador) fue de  $5,0 \text{ m/s}$  y la de salida (sobre el recipiente con producto)  $0,43 \text{ m/s}$ , las cuales también fueron determinadas con el medidor de velocidad de aire mostrado en la experiencias anteriores.

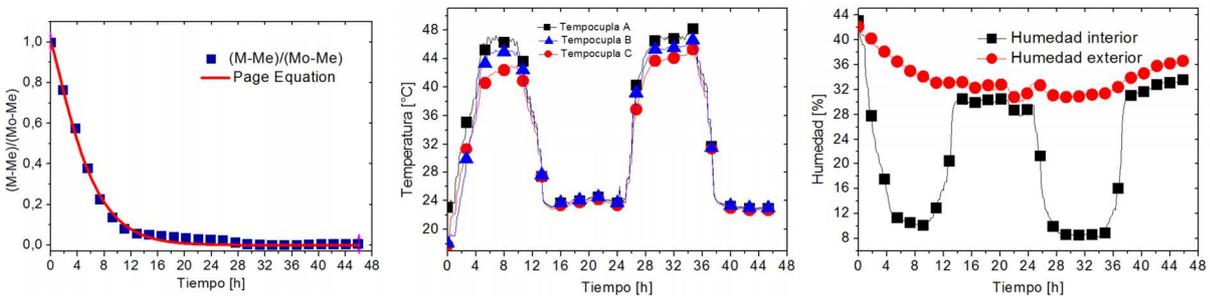


Gráfico 5: Evoluciones de (i) Pérdida de masa, (ii) Temperatura, (iii) Humedades

### Experiencia 6: Campo

Dentro del recipiente se colocaron 1151 g de producto, lo que equivale a una relación de carga de  $2,84 \text{ kg/m}^2$  de acuerdo a la bandeja utilizada en el deshidratador solar. Se aprovecharon dos ciclos solares desde las 9hs hasta las 17hs y durante ese tiempo la velocidad de entrada del aire (antes del ventilador) fue de  $2,73 \text{ m/s}$  y la de salida  $0,91 \text{ m/s}$  en cada una de las 3 salidas del colector y 3 entradas de la cámara de secado. La experiencia se realizó durante los días 21 y 22 de julio y el promedio de radiación solar emitida en la banda horaria durante la cual se realizó la experiencia fue de  $182 \text{ W/m}^2$ , con picos máximos de  $586 \text{ W/m}^2$  durante el día 21 y de  $573 \text{ W/m}^2$  durante el día 22.

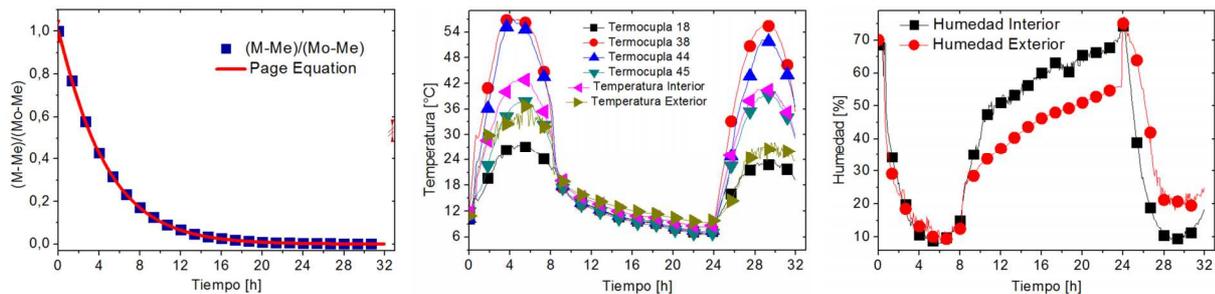


Gráfico 6: Evoluciones de (i) Pérdida de masa, (ii) Temperatura, (iii) Humedades

## MEDICIONES DE HUMEDAD

Para realizar las mediciones de humedad tanto del producto fresco como del producto deshidratado se utilizó un horno eléctrico de tipo mufla conectado a un selector de temperatura digital. En todos los casos se utilizaron bandejas descartables de aluminio de 10cm de diámetro para contener el producto. Para cada experiencia se tomaron 5 muestras aleatorias independientes del producto previamente y luego del proceso de secado. Las mismas fueron pesadas con una balanza de precisión (Scaltec SBA 41, con apreciación  $0,001 \text{ g}$  y capacidad máxima  $320 \text{ g}$ ). La temperatura se seteó a  $50^\circ \text{C}$  y las muestras de producto se dejaron dentro del horno durante 1 día. El objetivo de tomar 5 muestras fue para minimizar errores de acuerdo a la teoría estadística.

La siguiente tabla resume la humedad absoluta presente en el producto, anterior y posterior al proceso de secado durante las 6 experiencias:

	Experiencia 1		Experiencia 2		Experiencia 3		Experiencia 4		Experiencia 5		Experiencia 6	
	Inicial	Final										
Medida 1	89,6%	2,1%	93,2%	1,2%	90,1%	1,5%	90,3%	5,8%	90,6%	5,3%	91,2%	7,6%
Medida 2	85,8%	2,9%	93,0%	1,4%	86,9%	2,3%	92,1%	7,8%	90,1%	5,4%	86,4%	7,7%
Medida 3	88,8%	2,2%	92,9%	1,3%	88,4%	2,6%	90,1%	6,3%	89,6%	5,4%	88,9%	7,3%
Medida 4	87,2%	1,6%	91,5%	1,0%	89,2%	1,5%	88,7%	5,3%	89,6%	4,7%	88,9%	8,1%
Medida 5	89,2%	2,5%	93,0%	1,4%	88,7%	2,4%	89,9%	6,6%	90,0%	5,0%	88,1%	7,7%
Promedio	88,1%	2,3%	92,7%	1,2%	88,6%	2,1%	90,2%	6,3%	90,0%	5,2%	88,7%	7,7%

Tabla 1: Humedades absolutas del producto fresco (inicial) y del producto deshidratado (final)

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CURVAS DE SECADO

Basándonos en distintos trabajos sobre cinética de secado de capa delgada (Agrawal, 1977; Yunfei, 1987; Noomhorm, 1986) se ajustaron las curvas de secado al modelo matemático de Page con el objetivo de analizar la factibilidad del secado solar, determinando la similitud de las curvas obtenidas en laboratorio con las obtenidas en campo. La ecuación desarrollada por Page (1949) ha sido utilizada por muchos investigadores para describir la tasa de pérdida de humedad durante el secado de capa fina de los cultivos agrícolas. Overhuits (1973) usó esta ecuación para describir el secado en capa fina de la soja. La ecuación es la siguiente:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-K \cdot x^N) \quad (2)$$

Utilizando el software OriginPro8 se determinaron los parámetros de secado (K, N) de la ecuación de Page:

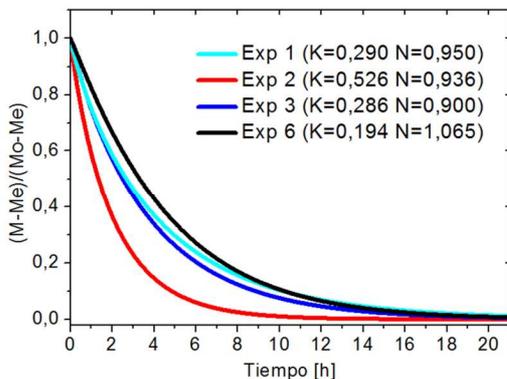


Gráfico 7 Cinética de secado de las experiencias constantes de laboratorio (Exp 1, 2 y 3) y solar en campo (Exp 6)

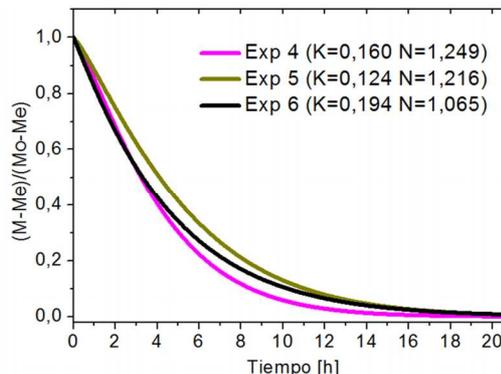


Gráfico 8 Cinética de secado de las experiencias solares de laboratorio (Exp 4 y 5) y solar en campo (Exp 6)

Los datos experimentales se encuentran detallados en las curvas de secado de cada una de las experiencias realizadas, los cuales fueron ajustados con el modelo matemático de Page. Los valores de los errores de ajuste entre los datos experimentales y los modelos teóricos de Page se muestran a en la siguiente tabla.

	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3	Experiencia 4	Experiencia 5	Experiencia 6
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	99,82%	99,97%	99,78%	99,66%	99,45%	99,26%

## CONCLUSIONES

El valor de temperatura con la cual obtenemos el menor tiempo de secado es de 50°C como puede apreciarse en la Experiencia 2 para una proporción de carga de 5 kg/m<sup>2</sup>. El tiempo de secado es de alrededor de 8 a 10 horas en régimen constante y de 16 horas en ciclos solares.

En particular, para las experiencias solares (simuladas y en campo) podemos destacar la conveniencia de interrumpir el flujo de aire forzado durante la noche, debido a que al bajar las temperaturas el aire húmedo ingresa a la cámara de secado produciendo un aumento en la humedad del producto como se evidencia en la gráfica de pérdida de peso de la experiencia 5.

Por último apreciamos la viabilidad del secado con aire calentado mediante colectores solares de matriz porosa combinándolo con un régimen de secado constante factible de utilización durante la noche o días de baja radiación solar.

## NOMENCLATURAS

MR = relación de humedad, pérdida de peso

M = contenido de humedad, masa en cada medición registrada por la balanza [kg]

$M_e$  = contenido de humedad de equilibrio [kg]

$M_o$  = contenido de humedad inicial [kg]

K, N = parámetros de secado

t = tiempo de secado [horas]

## REFERENCIAS

Espinoza R., Saravia L., Secado solar de productos agroalimentarios en Iberoamérica, ed. Cyted (2010)

Pistono Raschieri J., Desecación de los productos vegetales, ed. Reveré S.A., (1955).

Dr. Ing. Kneule Friedrich, Enciclopedia de la Tecnología Química "El Secado", ed. URMO, Munich (1976).

Agrawal, Y. C. and R. P. Singh. 1977. Thin-layer drying studies on short grain rice. ASAE Paper No. 777-3531, ASAE, St. Joseph, MO 49085.

Yunfei Li, R. Vance Morey. 1987. Thin-layer drying rates and quality of cultivated American ginseng. TRANSACTIONS of the ASAE 30(3): 842-847.

Noomhorm A. and Verma Lalit R. 1986. Generalized single-layer rice drying models. TRANSACTIONS of the ASAE 29(2): 587-591.

Page, C. 1949. Factors influencing the maximum rates of drying shelled corn in layers. Unpublished ;S, Thesis, Purdue University Library.

Overhults, D. D., G. M. White, M. E. Hamilton and I. J. Ross. 1973. Drying soybeans with heated air. TRANSACTIONS of the ASAE 16(1): 112-113.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Ing. Armando Cassinera, la Dra. Rita Abalone, el Sr. Danilo Messi y el Sr. Alberto Speranzini en el desarrollo de las experiencias. También se agradece al productor Héctor Ansaldi por el aporte de la espinaca fresca.

## ABSTRACT

The purpose of the current work is to evaluate the operation of the drying process of spinach with two different devices: an in-field solar dryer and a laboratory scale dryer, in which a solar cycle can be simulated. In addition, the drying curves of spinach obtained in laboratory at constant temperature and solar cycle simulation were compared. To reach that purpose, several laboratory experiences were made at different temperatures, with constant air speed. Also, in-field experiences were made, in an agricultural use solar dryer, designed for small producers. As the most important results, the temperature that causes the highest drying speed is about 50 °C, with a product load of 5 kg/m<sup>2</sup> and drying times between 8 to 10 hours at constant rate and 16 hours in solar cycles. Finally, the similar behavior between the drying curves obtained in the laboratory and in-field was demonstrated using the Page mathematical model.

**Keywords:** drying, spinach, laboratory, in-field.