



## OPTIMIZACION DE UN SECADERO SOLAR DE TIPO GABINETE: EVALUACION Y MODELIZACION DEL PROCESO DE SECADO Y TIPIFICACION DEL PRODUCTO SECO.

A. Busso<sup>1</sup>, N. Sogari<sup>1</sup>, H. G. Lancelle<sup>2</sup>, F. Arrieta<sup>2</sup>, J.P. Tokeff<sup>3</sup>, M. Leyes<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – UNNE

<sup>2</sup>Departamento de Química – Facultad de Ciencias Exactas – UNNE

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Agrarias – UNNE

Campus Libertad – Av. Libertad 4500 – 3400 Corrientes

Tel. 03783-473931 int. 129 – Fax 03783-473930 e-mail: [ajbusso@exa.unne.edu.ar](mailto:ajbusso@exa.unne.edu.ar); [nsogari@exa.unne.edu.ar](mailto:nsogari@exa.unne.edu.ar)

**RESUMEN:** Se exponen resultados de actividades emprendidas tendientes a la optimización de un secadero solar de tipo gabinete. El mismo es operado por un establecimiento local de productos frutihortícolas orgánicos (Granja Che Rovia) a la cual el grupo se encuentra prestando asesoramiento en el marco de un convenio firmado entre la Facultad y la Asociación de Productores Orgánicos de Corrientes. Se analizaron diferentes productos realizándose ensayos de secado en laboratorio y campo. El estudio comprende el proceso de secado, propiedades organolépticas y determinación del peso seco de los productos secos. A las curvas de secado, para productos de hoja, obtenidas en laboratorio se aplicó un modelo exponencial de pérdida de peso determinándose los parámetros característicos mediante ajuste de datos a la ecuación teórica del modelo. El modelo ajustado se comparó con resultados de campo. La correlación obtenida indica que su uso permitiría establecer estrategias de operación y producción para productos de hoja. Se determinó en 18% la eficiencia del secadero para el caso de secado de ortiga.

**Palabras clave:** energía solar, tecnología de secado, deshidratación, horticultura, secadero solar.

### INTRODUCCION

El cultivo de productos hortícolas (especies aromáticas, hortalizas y tubérculos) en la provincia de Corrientes resulta propicio, ya que el clima y el suelo lo benefician ampliamente. Sin embargo la industrialización de tales productos está limitada a la comercialización de la materia fresca.

La técnica de deshidratación de productos hortícolas contribuye a la transformación de los mismos permitiendo al productor incorporar una variante en la presentación de su mercancía para su comercialización. La ventaja para el productor de incorporar una tecnología de bajo costo, de instalación y manejo simple, es que dispondrá de otra alternativa para dar salida a su producción y utilizar aquellos productos de difícil aceptación en el mercado.

En éste sentido, la Asociación de Frutihorticultores, Granjeros, de Producción no Tradicional y Afines a través de su presidente, Cdr. Porfirio Hermosilla, solicitó al G.E.R – Grupo de Energías Renovables del Dpto. de Física – FaCENA – UNNE, asesoramiento sobre el aprovechamiento de energías renovables dentro del área de producción de su competencia.

Como primera etapa, se construyó y puso en funcionamiento, en la granja ecológica Che Rovia, un secadero solar de tipo gabinete de dimensiones apropiadas para pequeños productores. A pesar de ser ésta, una tecnología probada y conocida, se decidió realizar un análisis del mismo con el objetivo de evaluar su eficiencia y requerimientos energéticos ya que se prevé, en una segunda etapa, el acople de un sistema de biogás como fuente de energía adicional.

El trabajo se complementa con un estudio en laboratorio de las curvas de secado para los diversos productos a ser procesados y posterior evaluación y comparación de propiedades organolépticas y constitutivas respecto a su estado natural.

El presente escrito presenta principalmente, los resultados obtenidos hasta el momento en lo referente a este último punto.

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

*Mecanismo del secado:* En el proceso de secado, la cantidad de agua que se puede extraer del producto depende de su estructura. La transferencia de humedad hacia el exterior del producto, puede ocurrir por alguno de los diferentes mecanismos físicos que se enuncian a continuación (Sodha et al, 1987):

1.- Difusión continua en sólidos homogéneos; 2.- Flujo capilar en sólidos porosos; 3.- Flujo causado por encojimiento y gradientes de presión; 4.- Flujo causado por diferencia de presión; 5.- Flujo causado por secuencias de vaporización – condensación; 6.- Flujo causado por potencial eléctrico : electro-ósmosis; 7.- Flujo causado por gradientes de temperaturas: difusión térmica.

La influencia de cada uno de estos mecanismos es difícil de evaluar y no es el objetivo del presente estudio. No obstante ello, consideramos los mecanismos 2, 3, 4 y 7 como los de mayor contribución al proceso de secado en el tipo de productos ensayados.

La pérdida gradual de agua por parte del producto, hace que el comportamiento de éste frente al secado cambie en el tiempo, observándose dos regímenes a saber; régimen de velocidad constante y régimen de velocidad decreciente.

En el primer régimen, el secado es equivalente a la evaporación desde una superficie de agua libre presente sobre la superficie del sólido. Luego de la evaporación de cierta cantidad de agua, ésta equivalencia pierde validez y, a medida que la humedad del producto decae aumenta la resistencia al secado por procesos relacionados con el producto, resultando en una velocidad decreciente de secado o, segundo régimen.

En el caso de estrategia de secado en capas delgadas, esto es, toda la superficie del producto se encuentra expuesta a la corriente de aire de secado, el movimiento de la humedad desde el producto, en el régimen de secado de velocidad decreciente, cuando éste está expuesto al aire caliente que circula por sobre su superficie, puede ser expresado en términos de una ley similar a la de Newton:

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_e) \quad (1)$$

Integrando esta expresión se tiene:

$$\frac{M(t) - M_e}{M_{in} - M_e} = e^{-Kt} \quad (2)$$

Donde  $M_{in}$  es el contenido de humedad inicial ( $t = 0$ ),  $M_e$  es el contenido de humedad de equilibrio, ambos en base seca, y  $K$  es una constante de secado cuyo valor depende de la naturaleza del producto, de la temperatura y de la humedad relativa.

Expresando los contenidos de humedad,  $M$ , en términos de los pesos;  $M = \frac{P - P_s}{P_s}$ , reemplazando en (2), reordenando y

dividiendo por el peso inicial,  $P_{in}$ , se obtiene:

$$P_{\%} = P_{e\%} A e^{-t/\tau} \quad (3)$$

con  $P_{e\%} = \frac{P_e}{P_{in}}$ ;  $A = 1 - \frac{P_e}{P_{in}}$ ;  $\tau = \frac{1}{K}$ ; parámetros estos que dependen de la temperatura, humedad relativa y

velocidad de aire y que pueden ser determinados experimentalmente para un producto dado analizando sus curvas de secado obtenidas bajo diferentes condiciones del aire de proceso.

*Eficiencia del secadero:* El parámetro más importante en el proceso de secado es la potencia disponible para poder mantener el producto a temperatura constante. Por ello, el conocimiento de antemano del requerimiento energético mínimo es imprescindible para dimensionar adecuadamente la fuente de energía, colector solar en el presente caso. Este dato puede ser estimado a partir de la cantidad de humedad a ser removida del producto en cuestión.

Obviamente, el requerimiento neto de energía dependerá de la eficiencia del secadero, la cual se puede definir como:

$$\text{Eficiencia térmica total \%} = \frac{(\text{agua evaporada kg}) \cdot (\text{Calor latente de vaporización J/kg}) \cdot 100}{(\text{aporte neto de energía J})} \quad (4)$$

El denominador representa simplemente la energía útil provista por el colector durante el tiempo de secado, esto es,  $\eta A_c H$ , donde,  $\eta$  = eficiencia del colector,  $A_c$  = área neta de colección ( $m^2$ ) y  $H$  = Energía total ( $J/m^2$ ).

## DESARROLLO DE LAS EXPERIENCIAS

Para lograr el objetivo planteado en la introducción se comenzó por realizar experiencias de secado bajo condiciones controladas de laboratorio. Para tal fin, se construyó una estufa de secado que por sus características (flujo transversal a la bandeja y baja velocidad de aire) se asemeja a la forma de operar del secadero solar de gabinete. En la Fig.1 se muestran una vista de la estufa y componentes del sistema de medición.

La temperatura y velocidad del aire se varían regulando en forma independiente la potencia sobre el ventilador y la resistencia de un caloventor comercial. La bandeja descansa sobre un trípode apoyado sobre una balanza electrónica Mettler, con precisión de 0.01 gr, lo que permite un monitoreo continuo de dicha variable. En la medición de temperaturas se emplean sensores electrónicos LM35 distribuidos en diferentes puntos del sistema (ambiente, entrada y salida de cámara, antes y después de la bandeja). Para la medición de humedades se emplea un termo-higrómetro electrónico construido a tal efecto. El mismo está compuesto por un par de sensores LM35, uno operando como bulbo seco y el otro, recubierto por una camisa húmeda, operando como bulbo húmedo. Ambos sensores se encuentran en una corriente de aire de aproximadamente 3.5 m/s,

producida por un ventilador de 12V DC de fuente de alimentación de PC. El dispositivo se calibró frente a un termohigrómetro convencional de bulbo seco y húmedo y mercurio. Todos los sensores se conectan a un multiplexor que permite el escaneo manual de los canales de medición y lectura de salida directa con un voltímetro digital. La determinación de la velocidad del aire se efectuó a la salida de la cámara mediante un anemómetro de hilo caliente.

Las curvas de secado experimental obtenidas a diferentes temperaturas de secado se ajustaron a la ec.(3) mediante el utilitario Origin6.0, determinándose los parámetros  $P_{e\%}$ ,  $A$  y  $\tau$ , para cada una de ellas. Posteriormente, de una gráfica de los mismos en función de  $T$  se estableció, por regresión, la dependencia de ellos con la temperatura de secado.

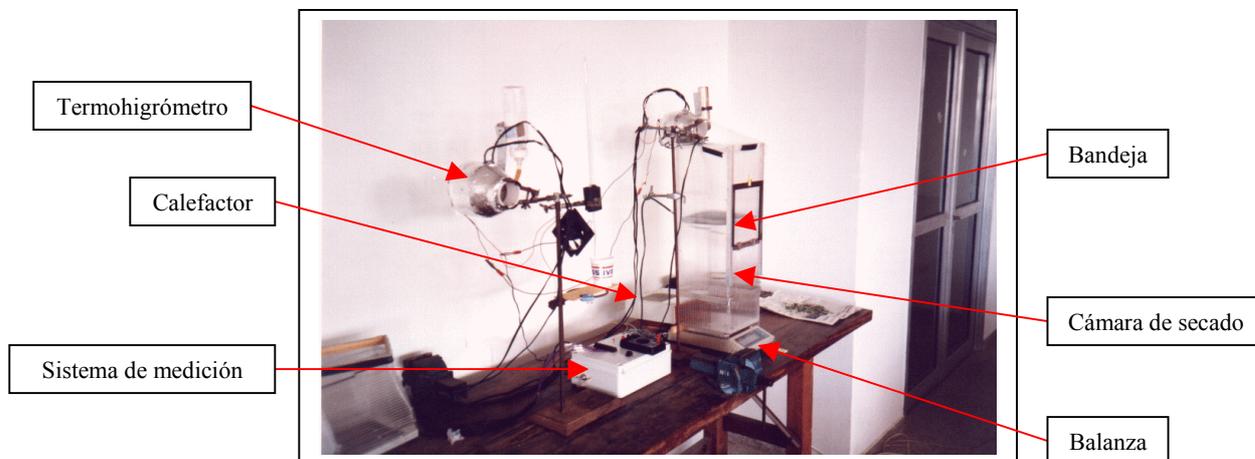


Figura 1: Vista de la estufa de secado y sus componentes

En los ensayos de campo se utilizó un secadero solar de tipo gabinete con capacidad en cámara de secado para 8 bandejas de  $0.25 \text{ m}^2$  cada una, apiladas en dos grupos de 4, según se muestra en la Fig.2.



Figura 2: Vista del secadero solar y detalle del interior de la cámara de secado.

El gabinete consiste en una estructura de madera semidura revestida en machimbre de pino de 10 mm tratado exteriormente con sellador y barniz para proteger de la influencia del medio ambiente. El interior se cubrió con una capa de poliestireno de 20 mm de espesor para disminuir pérdidas térmicas. El colector solar acoplado posee un área colectora neta de  $2 \text{ m}^2$ . La cubierta transparente es de policarbonato alveolar de 6 mm y la placa colectora de chapa galvanizada con ambas caras pintadas de negro mate con pintura comercial. El colector forma un ángulo de  $22^\circ$  con la horizontal. La Fig.2 expone un detalle del sistema y una vista interior de la cámara de secado. El precio total del secadero, sin incluir mano de obra, ronda los \$300.

Durante los ensayos, se monitoreó a lo largo del tiempo temperatura en diferentes puntos del sistema (ambiente, entrada y salida del colector, salida de cámara y chimenea), peso de una muestra testigo y radiación solar incidente en plano del colector. A fin de comparar los resultados obtenidos en laboratorio con los de campo, se seleccionó la bandeja inferior de un grupo de cuatro como bandeja testigo para el registro de pérdida de peso. Para la medición de temperaturas se emplearon termocúplas tipo K conectadas a un voltímetro de lectura directa. La humedad ambiente se determinó por medio de un termohigrómetro digital comercial de tipo hogareño y la radiación solar con un solarímetro fotovoltaico.

Para cada ensayo, sea de campo o laboratorio, se analizaron las propiedades organolépticas (olor, color y aroma) de los productos secos además de determinarse el peso seco a  $105^\circ \text{C}$  de cada uno de ellos.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las Fig.3 presenta curvas normalizadas de secado para diversos productos obtenidas a  $60^\circ \text{C}$ . Se visualiza cualitativamente la respuesta de cada producto al tratamiento de secado. Por otro lado, la Fig.4 muestra curvas de secado a diferentes

temperaturas para ortiga (*Urtica baccifera*), producto silvestre, de uso medicinal y de particular interés para el productor a quien se esta asesorando. Las líneas de trazo representan las curvas teóricas predichas por la ec.(3) luego de haberse realizado el ajuste de los datos experimentales. En ambos casos la velocidad del aire de secado es de 0.2 m/s, valor aproximado al registrado en el secadero solar para días de viento suave.

La Fig.5 presenta los datos obtenidos para una corrida típica de secado en el secadero solar. Las condiciones reinantes fueron de día claro con viento moderado. En ella se aprecia la variación del peso de la muestra testigo, las temperaturas del sistema en los diferentes puntos de registro y la humedad absoluta ambiente durante la duración de la experiencia. Se puede observar asimismo que, inmediato al cargado de la cámara, se produce una diferencia entre las temperaturas de entrada y salida de la misma (líneas verde y azul respectivamente) debida al aporte de humedad del producto a la corriente de aire de secado. Esta diferencia continúa hasta casi completado el proceso de deshidratación, según se aprecia de la curva de secado (círculos negros).

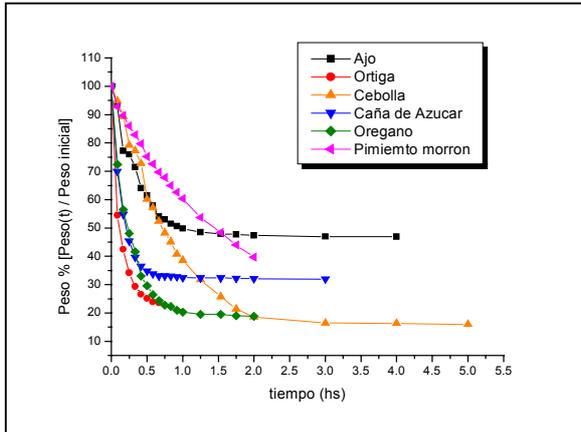


Figura 3. Curvas de secado para distintos productos a 60°C.

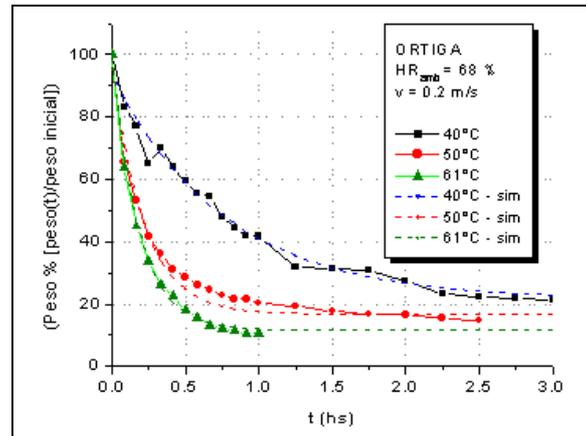


Figura 4: Curvas de laboratorio para el secado de ortiga.

Posteriormente, estos datos experimentales de campo se compararon con los predichos aplicando la ec.(3) y cuyo resultado se expone en la Fig.6. Para llevar a cavo éste cálculo, como temperatura aplicada en la ec.(3), se tomó el promedio de las temperaturas entre dos intervalos de tiempo sucesivos. Esto se debe a que la temperatura de entrada a la cámara varía continuamente según se aprecia en la Fig.5.

Como es sabido, la dinámica de todo proceso de deshidratación depende de la temperatura, humedad, velocidad del aire de proceso y de la morfología del producto. Por tanto, las diferencias entre ambas curvas, experimental y teórica, se debe, entre otras cosas, a que el modelo de pérdida de agua empleado depende exclusivamente de la temperatura a través de los parámetros  $P_{e\%}$ ,  $A$  y  $\tau$ , usados en la predicción, sin tomar en cuenta el resto de las variables antes mencionadas. No obstante ello, el modelo permite estimar tiempo y peso porcentual final aproximados lo que posibilita entonces, establecer estrategias de operación y producción.

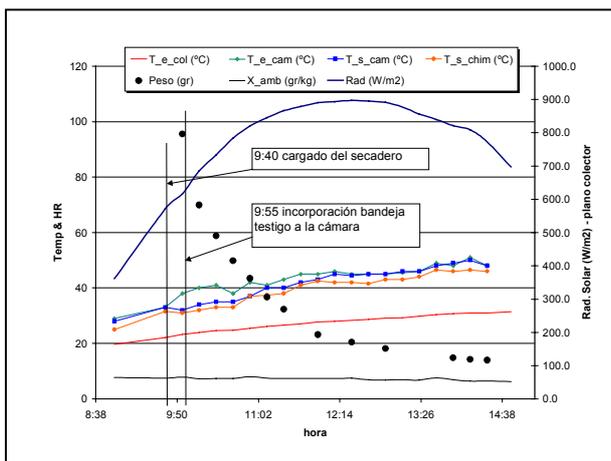


Figura 5. Ensayo de secado en secadero solar. Detalle de temperaturas, humedad absoluta, pérdida de peso y radiación solar.

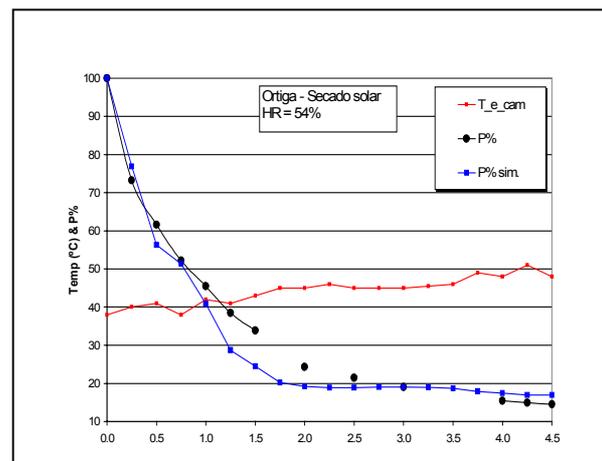


Figura 6. Comparación entre curva de secado, experimental y teórica (ec. (3)).

A partir de los datos experimentales disponibles se determinó una eficiencia para el colector empleado en el orden del 28.5%, siendo este un valor razonable para el tipo de dispositivo utilizado. (Benkert S, 1995; Duffie *et al*, 1991).

Aplicando la ec.[4] se obtiene una eficiencia térmica total para el secadero del orden del 18%.

En este respecto, se deben destacar dos puntos los cuales indicarían que este valor puede mejorarse; en primer lugar, en todos los casos el secadero no fue utilizado a su máxima capacidad y en segundo, la pendiente del colector (22°) no es la apropiada para hacer máximo aprovechamiento de la energía recibida.

#### CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO SECO

Las muestras fueron caracterizadas respecto al color, aroma y textura que presentaban luego del proceso de secado, tanto de laboratorio como solar. Se determinó además, en laboratorio, el peso seco a 105°C. Las tablas a continuación, presentan los resultados encontrados y la Fig.7 muestra la apariencia de la ortiga frente al secado a tres temperaturas diferentes.

Cabe mencionar que, para el secado solar, los productos presentaban en general decoloración en todos los casos de sobre exposición al secado, esto es, haber permanecido por más de un día sin ser retirados del secadero. Este problema es uno de los detectados y ocurre por falta de cuidado del personal interviniente, lo que va en detrimento de la producción del establecimiento.

Para la determinación del peso seco, el material fresco recién recolectado fue lavado con agua de la canilla en el laboratorio para eliminar tierra y polvo; se dejó escurrir y se extendió sobre hojas de papel sobre las mesadas. Transcurrida una hora se seleccionó parte del material y se separaron las siguientes fracciones:

- Fracción 1 – Tabla 2.: se pesó y extendió sobre la mesada, dejándola por 36 hs a temperatura ambiente, tiempo al cabo del cual, se pesó determinándose la pérdida de peso durante el oreado. Posteriormente, se separaron dos fracciones (4 y 5) que fueron colocadas en cápsulas limpias, secas y taradas; se pesaron y secaron en estufa a 105 °C durante 24 hs. Paso seguido, se sacaron y colocaron en desecador con sílica gel para luego pesarlas. Se repitió este procedimiento hasta obtener peso constante
- Fracciones 2 y 3 – Tabla 3.: se cortaron en trozos pequeños que se colocaron en cápsulas limpias, secas y taradas. Se pesaron y secaron en estufa a 105 °C por 36 hs. Paso seguido, se sacaron y colocaron en desecador con sílica gel para que alcanzaran la temperatura ambiente, luego de lo cual fueron pesadas.

Tabla 1. Propiedades organolépticas de algunos productos ensayados.

Producto	Rango de secado	Características del prod. Seco
AJO (Allium Sativum)	40 – 70 °C	En todos los casos conservo color, aroma. Quebradizo al tacto.
CEBOLLA (Allium Cepa)	60 – 70 °C	En todos los casos conservó color, aroma.
ORTIGA (urtica Baccifera)	40 – 60 °C	Producto de escaso olor en forma natural. Presento cierto pardeamiento a 60°C (fig7.) Quebradizo al tacto.
CEDRON (Aloysia Triphylla)	45 – 70 °C	Presento cierto pardeamiento a 70°C. Conservó color. Quebradizo al tacto.
CAÑA DE AZUCAR (Saccharum Officinarum) [triturada]	40 – 60 °C	En todos los casos conservo color. No se detectó cristalización del jugo. Quebradizo al tacto.
OREGANO (Origanum Vulgare)	40 – 60 °C	Presento cierto pardeamiento a 60°C. En todos los casos conservo aroma. Quebradizo al tacto.

Tabla 2.- Pérdida de peso por oreado durante 36 horas a temperatura ambiente.

Productos	ACELGA	PEREJIL	CEDRON
Peso inicial producto fresco (gr)	136.142	35.587	50.496
Peso producto oreado (gr)	47.694	14.973	15.569
% pérdida peso ( humedad )	64.97	57.93	73.13

Tabla 3.- Peso seco a 105 °C durante 36 horas.

Productos	ACELGA		PEREJIL		CEDRON	
	2	3	2	3	2	3
Muestras						
Peso inicial producto fresco (gr)	38.058	12.982	8.661	9.707	2.142	2.170
Peso seco a 105 °C (gr)	3.981	1.430	1.492	1.617	0.539	0.553
% peso seco a 105 °C	10.46	11.02	17.23	16.66	25.16	25.48
Contenido de humedad (base seca)	8.55	8.07	4.8	5	2.9	2.9
Contenido de humedad (base húmeda) %	89.54	88.98	82.77	83.34	74.84	74.52
Valores de referencia (H2Ogr/100gr ) (Mazzei <i>et al</i> , 1995.)	90.4 – 92		79 – 88			

Para ortiga, se trabajó con producto fresco y secado en secadero solar a temperatura media de aproximadamente 45 °C (la Fig.5 muestra detalles del secado). La muestra fresca se separó en tres fracciones, A, B y C. La fracción A se oreó a temperatura ambiente y las B y C se secaron en estufa a 105 °C . El producto seco a 45 °C se separó en dos fracciones, D y E. Ambas fueron sometidas a secado en estufa a 105 °C. Los resultados obtenidos se detallan en la tabla 4. De dicha tabla se desprende que, el producto seco a 45°C contiene un remanente de humedad del 8.5 % aproximadamente respecto del punto a 105 °C.

Tabla 4.- Peso seco a 105 °C de ORTIGA: producto fresco y producto secado en secadero solar a 45 °C

	Prod. fresco			secado a 45°C	
	A	B	C	D	E
Peso inicial (gr)	40.599	7.178	7.399	1.7488	1.2214
Peso producto oreado* (gr)	9.729	-	-	-	-
Peso seco a 105 °C * (gr)	-	0.933	0.943	1.6015	1.1170
% peso inicial	23.96	-	-	-	-
% peso seco 105°C	-	13.00	12.79	91.58	91.45
Contenido de humedad (base seca)		6.69	5.5		
Contenido de humedad (base húmeda) %	76.04	87.00	87.21	8.42	8.55

\* durante 36 horas

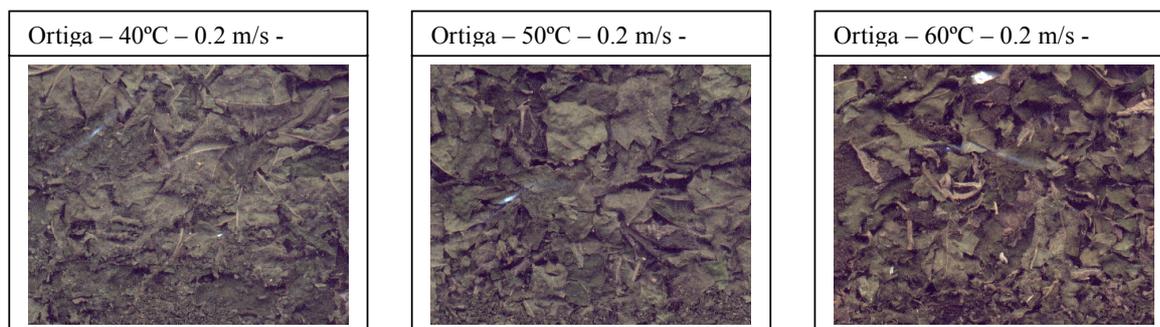


Figura 7. Apariencia de ortiga seca a diferentes temperaturas. Se aprecia pardeamiento a 60°C.

## CONCLUSIONES.

De experiencias de secado en laboratorio se ajustó un modelo exponencial para predecir la pérdida porcentual de peso. El mismo solo contempla la dependencia con la temperatura de secado de los parámetros involucrados. No obstante ello, su aplicación a resultados de campo en secadero solar permitiría su uso para establecer estrategias de operación y producción para productos de hoja. Se debe profundizar sobre éste punto para verificar su validez con otro tipo de productos.

Se determinó una eficiencia térmica total para el secadero del orden del 18% que consideramos puede ser mejorada.

Se analizaron las propiedades organolépticas de los productos secos obteniéndose resultados considerados como de buena calidad. El contenido de humedad determinado coincide con lo reportado en tablas de referencia consultadas.

Actualmente se están llevando a cabo análisis para determinar componentes constitutivos y comparar contenidos respecto del producto fresco.

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Cdr. Porfirio Hermosilla y a la Asociación de Frutihorticultores, Granjeros, de Producción no Tradicional y Afines, por el apoyo, tanto financiero como material, que hace posible la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

Benkert S., Modellierung und Experimentelle Überprüfung einer Pilotanlage zur solaren Holz Trocknung, Universidad Técnica de Munich, 1995.

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

Mazzei, M.E.; Puchulu, M.R. y Rochaix, M.A, (1995). Tabla de Composición Química de Alimentos, 2da. Edición.

CENEXA – FEIDEN.

Sodha M., Bansal N., Kumar A., Bansal P., Malik M. A. S., (1990). Solar Crop Drying, Vol. II. CRC Press.

## ABSTRACT

Results of activities aimed at the optimisation of a cabinet type solar dryer are presented. The dryer is operated by a local organic farm (Granja Che Rovia) to which this group is lending advice within the frame of an agreement signed between the Association of Organic Producers of Corrientes and the Physics Dpnt of FaCENA - UNNE. Several products were analysed. In all cases drying curves were obtained in the laboratory and with the solar dryer as well as. The study comprises the drying process, physical properties and determination of the dry weight of the dried products. To the drying curves obtained in laboratory for leaf products an exponential model of loss of weight was applied. The characteristic parameters were determined by three-variable parameters curve fitting of experimental data using the theoretical equation as fitting function. The adjusted solution was compared with field results. The correlation obtained indicates, in principle, that it could be used to establish operation and production strategies for leaf products. It was also determined a total thermal efficiency for the dryer in the order of 18%.

**Keywords:** solar energy, drying technology, dehydration, horticulture, solar dryer.