

Cinética de secado de la hoja de naranja amarga (*Citrus Aurantium*), bajo condiciones controladas y en un secador solar directo con convección natural y forzada

CASTILLO-TÉLLEZ-Margarita*†, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, ANDRADE-DURÁN, Juan E y LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, predio s/n por Av Humberto Lanz Cárdenas y Unidad Habitacional Ecológica ambiental, Col. Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México².

Recibido Enero 27, 2017; Aceptado Mayo 31, 2017

Resumen

La naranja amarga es un árbol originario de Asia, la hoja de este árbol es utilizada ampliamente en muchos lugares del mundo tanto para el aprovechamiento de su valor alimenticio y medicinal, como para la elaboración de perfumes, agua de azahar, licores, confituras y aceite esencial. En Tabasco, Yucatán y Campeche se cultiva ampliamente esta variedad de naranja. En este trabajo se presentan las cinéticas de la deshidratación de las hojas de naranja amarga y la velocidad de secado utilizando un horno no convectivo a condiciones controladas de temperatura: 45 °C, 55 °C y 65 °C, obteniéndose tiempos de secado de 690, 460 y 330 minutos respectivamente y, un secador solar tipo gabinete con convección forzada y natural con tiempos de secado entre 400 y 310 minutos. La humedad inicial varió entre 80 % y 83 %, la humedad final se midió entre 6.45 % y 9 %. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Secado Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche, localizada a 9°51'00" de LN y 90°31'59" de LO, con clima cálido húmedo, con humedad relativa promedio anual de 60 % y con valores de irradiación máximos promedio de 900 W/m². Los resultados obtenidos muestran la factibilidad técnica del secado solar de las hojas de naranja amarga, obteniendo un valor agregado y alentando su producción en México.

Secador solar directo, Secado con temperaturas controladas, Convección natural y forzada

Abstract

Bitter orange is a tree native to Asia, the leaf of this tree is widely used in many places of the world both for the use of its nutritional and medicinal value, as well as for the production of perfumes, orange blossom, liqueurs, jams and oil essential. In Tabasco, Yucatan and Campeche this orange variety is widely cultivated. In this work the kinetics of dehydration of bitter orange leaves and the drying rate using a non-convective oven at controlled temperature conditions are presented: 45 °C, 55 °C and 65 °C, yielding drying times of 690, 460 and 330 minutes respectively, and a cabinet-type solar dryer with forced and natural convection with drying times between 400 and 310 minutes. The initial humidity varied between 80 % and 83 %, the final humidity was measured between 6.45 % and 9 %. The tests were carried out in the Solar Drying Laboratory of the Facultad de Ingeniería of the Universidad Autónoma de Campeche, located at 9°51'00" of LN and 90°31'59" of LO, with warm humid climate, with annual average relative humidity of 60 % And with average maximum irradiance values of 900 W/ m². The results show the technical feasibility of solar drying of bitter orange leaves, obtaining an added value and encouraging its production in México.

Direct solar dryer, Drying with controlled temperatures, Natural and forced convection

Citación: CASTILLO-TÉLLEZ-Margarita, OVANDO-SIERRA, Juan Carlos, ANDRADE-DURÁN, Juan E y LEZAMA-ZÁRRAGA, Francisco. Cinética de secado de la hoja de naranja amarga (*Citrus Aurantium*), bajo condiciones controladas y en un secador solar directo con convección natural y forzada. Revista de Sistemas Experimentales. 2017. 4-11: 34-41.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: mcastill@uacam.mx)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El Naranja Amargo (*Citrus aurantium*) actualmente se cultiva en países de clima subtropical a cálido; requiere de terrenos soleados, bien drenados, ligeramente ácidos y ricos en humus. Es un árbol de hoja perenne de 8-10 m de altura, y abundante follaje, tronco grueso, erecto; corteza suave, café, ramas verdes y espinas no muy puntiagudas de 2 a 8 cm de largo. Hojas elípticas o lanceoladas de color verde intenso, de aproximadamente 8 cm de largo y de 4 a 8 cm de ancho con el ápice agudo, sinuosas o crenadas, alternas, brillantes, con pequeña glándulas de aceite, peciolo alado, ancho, de 6 a 13 cm de longitud. Las flores muy aromáticas (conocidas popularmente como azahares), blancas o rosadas.

El naranja amargo es la especie más perfumada de las 15 que comprende el género *Citrus*. La cáscara, la flor, la hoja y la corteza de la fruta se utilizan en medicina tradicional y moderna (Jeff MJ, 2002). Es una hierba china que ha demostrado aumentar el metabolismo y mejorar la capacidad del cuerpo para quemar grasa y perder peso sin efectos secundarios negativos para el organismo (Moro Co, 200) y (Calapai, G, *et. al*, 1999).

La infusión preparada con las hojas se utiliza para el tratamiento de afecciones digestivas (cólicos, dispepsia, inapetencia, náuseas), además, es ampliamente utilizada en afecciones respiratorias (bronquitis, tos, resfrios), tanto las hojas como la flor son excelentes ansiolíticos naturales que la naturaleza puede brindar porque actúa sobre los órganos que se ven afectados por la ansiedad, relajan el cuerpo, y son muy útiles en casos de gastritis nerviosa, cólicos, diarrea, estreñimiento y dolores intestinales a nivel general (PROTEGE, Red de Protección Social, Ministerio de Salud, Gobierno de Chile, 2000).

Secado solar de la hoja de naranja amarga

Existe una importante cantidad de publicaciones de deshidratado de diferentes tipos de hojas como son ajeno, caléndula, tomillo, salvia, orégano, lavanda y menta, mencionando los que más abundan en la literatura (Banchero Luján, *et al*, 2008). El proceso de secado consiste en la extracción del agua en exceso y para cada hierba existen valores preestablecidos de contenido de agua requeridos para su comercialización en seco, los cuales varían entre 9 % y 10 %.

Un correcto secado permite evitar la proliferación de microorganismos, evitar cambios de color y ennegrecimiento, lograr un producto homogéneo, de buen color y la conservación de esencias y sustancias antioxidantes. La pérdida de peso en el secado depende de la especie, del órgano y la época de recolección (Moré Eva, *et al*, 2013).

El secado de las plantas en general se realiza por exposición directa al sol. En el secado a cielo abierto, las ramas y hojas se colocan sobre una malla media sombra o plástico, sin encimarlas, se dejan hasta el atardecer y si no se han secado se recogen y guardan bajo techo, continuando al día siguiente, así hasta completar el proceso y una vez secas las hojas se separan de los tallos. Con baja humedad y capa delgada se puede hacer en un plazo de 9 a 10 horas, reduciendo su humedad del 80 % al 10 % (Oddore, B., 1999). Se han realizado estudios experimentales de secado en condiciones controladas con hojas de stevia, en los cuales se han encontrado resultados muy semejantes al secado solar de gabinete (Castillo *et. al*, 2006).

En la literatura se reporta un estudio del secado solar de hojas de naranja amarga (L. Ait Mohamed, *et al*, 2005), en el que se realizó la deshidratación de las hojas mediante un secador indirecto el cual funciona con un sistema de calefacción auxiliar y se impulsa el aire bajo condiciones controladas.

A partir de las curvas de secado experimentales obtenidas concluyen que el principal factor que influye en la cinética de secado es la temperatura del aire de secado.

En el presente trabajo se detalla en el apartado del estudio experimental los materiales utilizados y el método de trabajo llevado a cabo para la deshidratación de las hojas de naranja, se explica también la instrumentación de los secadores solares utilizados en la experimentación y aparatos de medición utilizados.

Se presenta en el apartado de resultados experimentales y discusión el comportamiento de los principales parámetros climatológicos que influyen en la deshidratación como son la temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar de un día soleado durante los días de prueba a manera de ejemplo; se muestra además, el estudio de las cinéticas de secado solar, contenido de humedad y velocidad de secado obtenidas en un secador directo tipo gabinete con y sin convección forzada, comparado con el deshidratado en un secador convencional con calentamiento eléctrico no convectivo a temperatura controlada en un rango entre 45 °C y 65 °C.

Finalmente, se concluye presentando los principales datos que experimentalmente nos llevan a determinar las condiciones y método de secado óptimo de la hoja de naranja amarga en función de las tecnologías evaluadas.

Estudio experimental

Se analiza experimentalmente el proceso de secado de la hoja de naranja agria (*Citrus Aurantium*) en un secador solar tipo gabinete y en un secador convencional con calentamiento eléctrico no convectivo a temperatura controlada en un rango entre 45 °C, 55 °C y 65 °C.

Materiales y Métodos

Materia prima. Se seleccionaron las hojas maduras de naranja agria, cultivadas en la ciudad de Campeche, Campeche. Se cortaron las ramas, se separaron las hojas y se seleccionaron para obtener un grupo homogéneo, basado en la madurez, color, frescura. Se lavaron y pesaron, se midió el ancho, largo y espesor.

Métodos. En este trabajo, se analiza experimentalmente el proceso de deshidratación de la hoja de naranja agria en un secador convencional no convectivo con calentamiento eléctrico y en un secador solar tipo gabinete.

Secador eléctrico no convectivo. Para la obtención de la cinética de secado, se utilizó un horno eléctrico marca Riossa sin convección de aire. Se registró la pérdida de peso mediante un software y se variaron las temperaturas de secado.

Secador solar directo tipo gabinete. Se empleó un secador solar de tipo directo construido en material plástico transparente con una superficie de tratamiento de 0.5 m². La cámara contiene una charola absorbadora de la radiación solar en donde se coloca el producto. Cuenta con perforaciones en las partes laterales, fondo y trasera, para permitir la circulación y extracción del aire húmedo caliente.

La superficie frontal tiene una pendiente de 20° para aprovechar la radiación solar incidente y permitir en su caso la condensación y escurrimiento del agua. Puede operar en convección natural o forzada, mediante un ventilador colocado en la parte trasera, de una potencia de 20 W, y permite una velocidad del aire máxima de 2 ms⁻¹. En este trabajo se utilizaron dos secadores solares, uno operando a convección natural y otro a convección forzada.

La figura 1 muestra los secadores solares tipo gabinetes utilizados.



Figura 1 Secador solar directo tipo gabinete

En cada secador se registró la temperatura interior, el peso y tamaño de las muestras, así como la irradiancia solar, la humedad relativa y la temperatura del aire.

Instrumentación

Humedad. Para la determinación de la humedad se utilizaron dos balanzas con analizador de humedad, marca, Ohaus MB45, respectivamente, con una precisión de $\pm 0.01\%$ mg, Se cortaron las hojas de las ramas y se colocó una muestra de aproximadamente 1.0 g y se procedió a su deshidratación, obteniéndose el valor de la humedad. Este procedimiento se realizó antes y después de realizar las diferentes cinéticas de secado.

Actividad de agua (aw). La actividad de agua es un parámetro que determina la estabilidad de los alimentos con respecto a la humedad ambiental. Se determinó la actividad de agua para la hoja fresca y posteriormente para la hoja seca. Se utilizó un equipo marca Rotronic Hygropalm de tipo portátil, con una precisión de $\pm 0.01\%$ mg.

Condiciones Climatológicas. Durante el período de pruebas se registraron los parámetros climatológicos en la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la UAC. Las características (datos del fabricante) son los mostrados en la Tabla 1:

Variable	Descripción	Modelo	Error Máximo
Radiación global	Piranómetro marca LI-COR	LI-200R	Azimet: $< \pm 1\%$ sobre 360° a 45° de elevación
Humedad relativa	NRG Systems	RH-5X	$\pm 3\%$
Temperatura ambiente	NRG Systems	110S	$\pm 1.1^\circ\text{C}$
Dirección del viento	NRG Systems	Series #200P	$\pm 3^\circ$
Anemómetro	Windsensor	P2546COPR	± 0.3 m/s

Tabla 1 Características y descripción de los instrumentos de medición de la estación meteorológica

Resultados experimentales y discusión

El estudio experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Secado Solar de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Campeche. El período de pruebas fue del 1 al 30 de abril del 2017.

En la Gráfica 1, se presentan las evoluciones de los parámetros climatológicos durante las pruebas del 4 de abril. La irradiancia global máxima alcanzada fue de 900 W/m^2 , siendo el intervalo de los valores máximos promedio entre 850 W/m^2 y 950 W/m^2 .

Los valores de la temperatura ambiente oscilaron entre 30°C y 36.3°C , siendo el promedio 33°C . Por otro lado, el valor mínimo que alcanzó la humedad relativa en el día fue 35% , el promedio mínimo en los días de prueba osciló entre 34% y 36% .

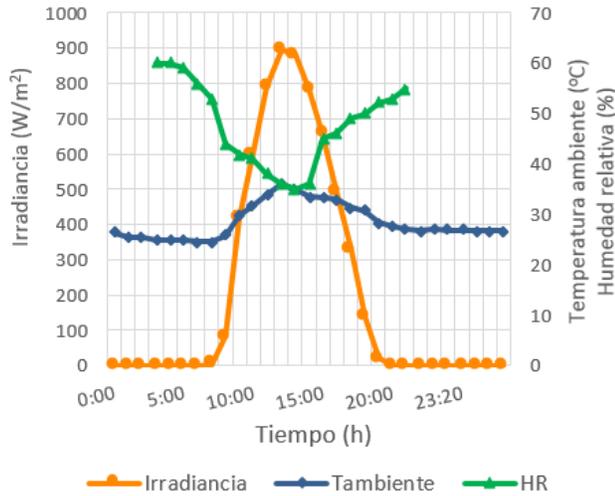


Gráfico 1 Irradiancia solar global, temperatura ambiente y humedad relativa el día 4 de abril del 2017

Secado no convectivo a temperatura controlada

Se llevaron a cabo las pruebas de deshidratación de las hojas de naranja agria obteniéndose las cinéticas de secado a temperaturas controladas de 45 °C, 55 °C y 65 °C, realizándose tres experimentos por cada una de ellas. Las hojas tratadas tuvieron un peso promedio de 1.52 g. En el horno se introdujeron 20 g. En la Tabla 2, se presentan las humedades iniciales y finales y actividad del agua de la hoja fresca y seca. Las humedades iniciales oscilaron muy poco, mientras que las finales fueron inferiores a las obtenidas en los productos comerciales entre, 8.7 % y 7.4 %. Los valores finales de la aw indican que no hay posibilidad de crecimiento microbiano en el producto deshidratado obtenido.

Temperatura	Humedad (%)		A _w	
	Inicial	Final	Inicial	Final
45 °C	80.50	7.46	0.891	0.265
55 °C	80.68	8.57	0.890	0.201
65 °C	82.74	8.70	0.762	0.289

Tabla 2 Humedades (%) y actividad del agua (aw) para las tres temperaturas seleccionadas

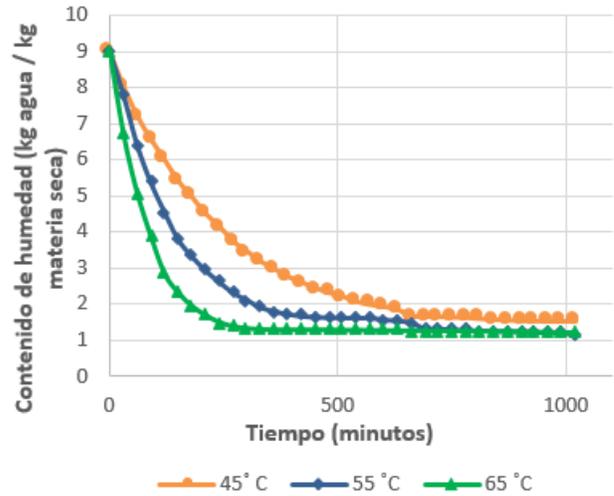


Gráfico 2 Variación del contenido de humedad respecto al tiempo de secado en condiciones controladas a 45 °C, 55 °C y 65 °C en el secador eléctrico

El Gráfico 2 muestra el comportamiento del contenido de humedad en base seca para las tres temperaturas establecidas, con tiempos de secado de 690 minutos para una temperatura de 45 °C, 460 minutos para 55 °C y finalmente 330 minutos para 65 °C.

La Gráfica 3, representa las evoluciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad para cada una de las temperaturas de secado. En el intervalo de 55 °C a 65 °C, se presentaron las velocidades más altas y a 65 °C, se obtuvo un periodo de velocidad decreciente, por otro lado, a 55 °C se observaron dos periodos de velocidad decreciente y finalmente, a 45 °C se observaron varios periodos de velocidad casi constante, los intervalos de contenido de humedad en base seca fueron: 7.8 y 4.5 para 55 °C y 3.89 para 65 °C.

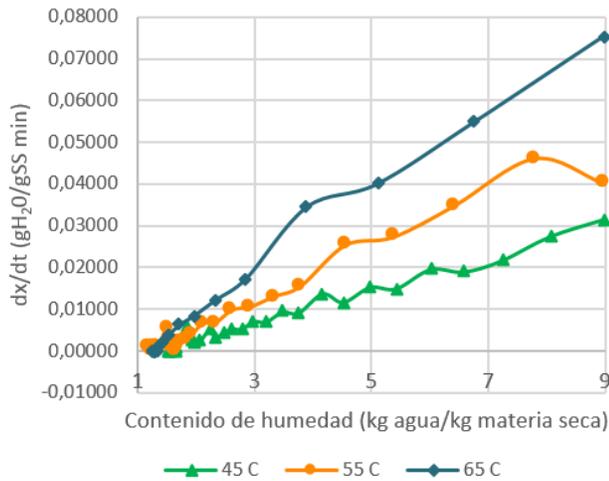


Gráfico 3 Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad a diferentes temperaturas de secado; 45 °C, 55 °C y 65 °C en el secador eléctrico

Secado solar directo

En la Tabla 3 se muestran los valores de actividad del agua (a_w), humedad inicial y humedad final de dos pruebas realizadas a hojas frescas de hoja de naranja en el secador solar con convección natural y con convección forzada. Como se puede observar, existe poca variación tanto en los valores de humedad como de actividad del agua, resultando casi independientes del modo de funcionamiento del secador solar.

Muestra	Humedad (%)		Actividad de agua (a_w)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Secado con convección natural	81.26	8.85	0.89	0.209
Secado con convección forzada	80.20	8.75	0.83	0.228

Tabla 3 Humedades (%) y actividad del agua (a_w) en secador solar con convección natural y forzada

El gráfico 4 muestra las temperaturas alcanzadas en el interior de las cámaras de secado de los secadores funcionando con convección natural y con convección forzada, así como la irradiancia durante el día mostrado como ejemplo (4 de abril del 2017).

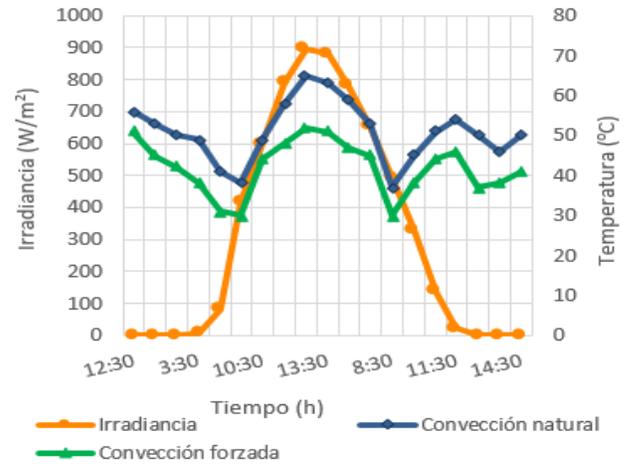


Gráfico 4 Comportamiento de la irradiancia solar y las temperaturas al interior de las cámaras de secado para los diferentes modos de funcionamiento

Como puede observarse en la grafica anterior, las temperaturas en la cámara de secado del secador con convección natural son más elevadas que las que presenta el secador con convección forzada, lo cual es normal debido a la poca convección que se da en el primer caso. La coincidencia de las temperaturas mayores en ambas cámaras de secado con la irradiancia solar obtenida en el día de prueba es clara. El Gráfico 5, presenta la evolución de la humedad en los secadores funcionando a convección natural y forzada.

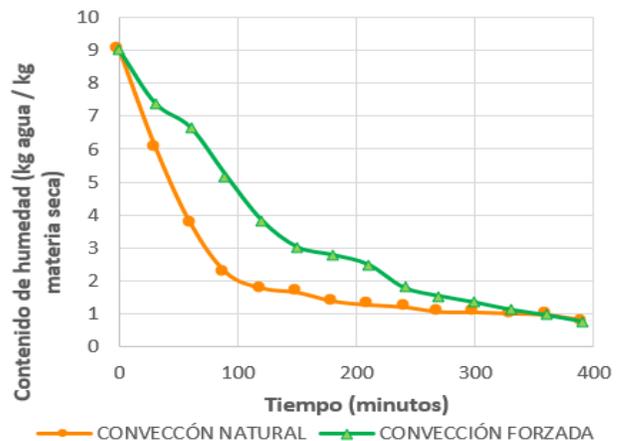
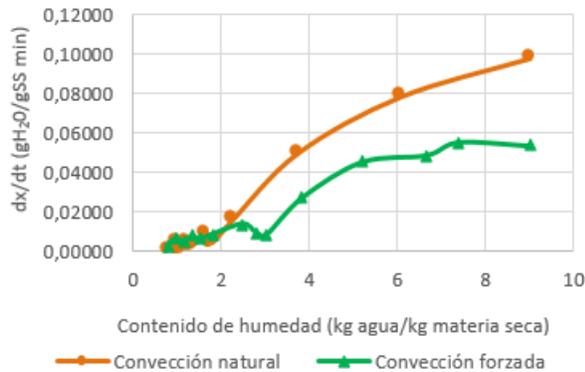


Gráfico 5 Variación del contenido de humedad en los secadores solares con convección natural y con convección forzada

Como se puede observar, la cinética a convección natural en este tipo de secadores es más rápida que la correspondiente a convección forzada, debido básicamente a que se obtiene una mayor temperatura, a causa de un menor intercambio térmico con el aire que se encuentra a una velocidad baja. En convección forzada se alcanza una temperatura menor debido a una mayor circulación del aire, provocando la homogenización térmica, resultando una temperatura menor que en el caso de la convección natural. Este efecto se puede observar en los tiempos correspondientes de secado, en donde se tiene para convección forzada 400 minutos y 310 minutos para la convección natural.

El Gráfico 6 presenta la variación de las velocidades de secado en cada uno de los secadores directos en función del contenido de humedad.



Gráfica 6 Variación de la velocidad de secado con respecto a la variación del contenido de humedad obtenido con los secadores solares con y sin convección forzada

En el caso del secador con convección natural no se observó ningún periodo de velocidad constante, la velocidad más alta fue la de convección natural con un tiempo de secado de 310 minutos. En el caso del secado eléctrico a 65 °C, se encontró la velocidad más alta en un tiempo de secado de 330 minutos.

Conclusiones

Las cinéticas de secado bajo condiciones controladas mostraron tiempos de deshidratación entre 5.5 horas y 8 horas, entre 45 °C y 65 °C, siendo lo óptimo 55 °C, con un tiempo de 6.0 h. Los tiempos de secado obtenidos en el gabinete solar con convección natural fue más corto, 5.1 h para convección natural y 6.6 h para convección forzada, por lo tanto, fueron similares a las condiciones controladas de 55 °C, debido a que en convección natural se pueden alcanzar temperaturas más altas o cercanas a los 55 °C.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que es factible el secado solar de la hoja de naranja agria mediante el secado solar en gabinete, obteniendo una ventaja considerable sobre el secado en horno eléctrico debido a que se logra alcanzar un ahorro energético importante con poca inversión y mínimo mantenimiento, obteniendo un producto deshidratado de alta calidad, contribuyendo además al cuidado del medio ambiente.

Referencias

Banchero Luján, Carballo Sergio, Telesca Juan, 2008. Manual de secado solar de especies medicinales y aromáticas para predios familiares. Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA, Montevideo – Uruguay.

Calapai G, Firenzuoli F, Saitta A, *et al.* Antibiosis and cardiovascular toxic effects of *Citrus aurantium* extracts in the rat: a preliminary report. *Fitoterapia* 1999; 70:586–92.

Castillo Téllez Margarita, Castillo Téllez Beatriz, Ovando Sierra Juan C. Estudio experimental de la deshidratación de las hojas de stevia (*rebaudiana bertonii*), bajo condiciones controladas y con un secador solar del tipo gabinete. VI Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas del Frío Coimbra-Portugal, 3-6 mayo, 2016.

Jeff MJ. (Pharm D). Therapeutic Research Facility. Natural Medicines Comprehensive Database, 4th edición, 2002.

L. Ait Mohamed, M. Kouhila A. Jamali, S. Lahsasni, N. Kechaou, M. Mahrouz, 2005. Single layer solar drying behaviour of *Citrus aurantium* eaves under forced convection. *Energy Conversion and Management* 46,1473–1483.

MHT, Medicamentos Herbarios Tradicionales. PROTEGE, red de protección social, Gobierno de Chile, Ministerio de Salud.

Moré Eva y Melero Roser. Transformación de plantas aromáticas y medicinales. Intradés (Innovación y transferencia para el desarrollo rural), Fundación Europea Fondo Social Europeo), Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Programa Emplea Verde, 2007-20013.

Moro CO y Basile G. Obesity and medicinal plants. *Fitoterapia* 2000; 71:73–82.

Oddore, B., How grow Stevia. 1999, Guarani Botanicals, INC. Pawcatuck, Connecticut, 1-30.