

## ESTUDIO EXPERIMENTAL Y MATEMÁTICO DE LA DESHIDRATACIÓN DE MAÍZ CON TECNOLOGÍAS DIRECTAS Y HORNO A TEMPERATURAS CONTROLADAS

### EXPERIMENTAL AND MATHEMATICAL STUDY OF MAIZE DEHYDRATION WITH DIRECT TECHNOLOGIES AND OVEN CONTROLLED TEMPERATURES

Castillo-Téllez M.\*, Castillo-Téllez B., Sarracino- Martínez O., Hernández-Gálvez G., Ovando-Sierra, J.C

[mcastill@uacam.mx](mailto:mcastill@uacam.mx),

*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, México.*

[Beatriz.castillo@academicos.udg.mx](mailto:Beatriz.castillo@academicos.udg.mx)

*Universidad de Guadalajara, Centro Universitario del Norte, Carretera Federal No. 23, Km. 191, C.P. 46200, Colotlán, Jalisco, México*

[omar\\_sarra@hotmail.com](mailto:omar_sarra@hotmail.com), [geovannisg@yahoo.com](mailto:geovannisg@yahoo.com)

*Universidad Popular De La Chontalpa. Carr. Cárdenas-Huimanguillo Km. 2. H. Cárdenas, Tabasco, México, C.P.*

[jcovando@uacam.mx](mailto:jcovando@uacam.mx)

*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, México.*

#### RESUMEN

El maíz es junto con el trigo y el arroz uno de los cereales más importantes del mundo, suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales y es una materia prima básica de la industria de transformación con la que se producen almidón, aceite y proteínas, edulcorantes alimenticios y desde hace poco, combustible. Se presentan el deshidratado de maíz y la velocidad de secado utilizando horno eléctrico no

convectivo con condiciones controladas de temperatura (45°C y 55°C), obteniéndose tiempos de secado de 23 y 35 horas sol respectivamente; un secador solar directo con convección natural y forzada y, cielo abierto. Los tiempos de secado obtenidos fueron 32, 40 y 50 horas sol respectivamente. La humedad inicial y final promedio fueron de 83% y 12%. 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, humedad relativa promedio anual de 50% y valores de irradiancia máximos promedio de 900 W/m<sup>2</sup>. El mejor tiempo de secado alcanzado en los secadores de gabinete evaluados fue comparable con el deshidratado en horno a 55°C; por lo tanto, es recomendable utilizar la convección natural en esta tecnología debido a la economía energética, el grano del maíz presenta una calidad final aceptable. Los modelos Logarítmico, Page y Page modificado fueron los que mejor se ajustaron a los resultados experimentales con secador solar tipo gabinete con convección natural, con un  $r^2$  de 0.9920, 0.9478 y 0.9892, respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron la factibilidad técnica del secado solar del maíz, obteniendo un muy importante ahorro energético, además de obtener un

producto deshidratado de buena calidad, lo cual tiene un fuerte impacto económico, social y ambiental en virtud de su elevado valor agregado.

**Palabras clave:** Secador solar directo, Secado con temperaturas controladas, Convección natural, Convección forzada, Cielo abierto.

## ABSTRACT

Corn, together with wheat and rice, is one of the most important cereals in the world, it supplies nutrients to humans and animals and is a basic raw material for the processing industry that produces starch, oil and proteins, food sweeteners and, recently, fuel. In this work, we present the dehydration of corn and the velocity of drying using a non-convective electric oven with controlled temperature conditions (45 °C and 55 °C), obtaining drying times of 23 and 35 hours

respectively; a direct solar dryer (cabinet) with natural and forced convection and finally, open sun. The drying times obtained were 32, 40 and 50 sun hours respectively. The average initial and final humidity were 83% and 12%. 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 hot-humid climate, annual average relative humidity of 50% and average maximum irradiance values of 900 W/m<sup>2</sup>. The best drying time achieved in the cabinet dryers evaluated was comparable with the dehydrated oven at 55°C; therefore, it is advisable to use natural convection in this technology due to the energy economy, the grain of the corn presents an acceptable final quality. The Logarithmic, Page and Modified models were the ones that best adjusted to the experimental results with

cabinet type solar dryer with natural convection, with an  $r^2$  of 0.9920, 0.9478 and 0.9892, respectively. The results obtained showed the technical feasibility of solar drying of corn, obtaining a very important energy saving, in addition to obtaining a dehydrated product of good quality, which has a strong economic, social and environmental impact by its high added value.

**Key words:** Direct solar drying, Drying with controlled temperatures, Natural convection, Forced convection, Open sun.

## INTRODUCCIÓN

Con un consumo per cápita promedio de 379 g/día, el maíz (*Zea mays* L.) es el alimento más importante en México. Al contar con una producción anual de 24.5 millones T, México fue el sexto productor mundial en el periodo 2015-2016 [1]. Tradicionalmente el maíz se

seca a exponiéndolo al aire libre, durante este período, el producto se contamina por el suelo, partículas de arena y materia en el medio de secado [2], además debido al moho que crece durante el proceso de secado al sol, el maíz puede dañar la salud de las personas que lo consumen.

## **EL SECADO SOLAR.**

Desde tiempos inmemorables se ha utilizado el secado solar para la preservación de cultivos agrícolas y se hizo especialmente secándose al sol, al aire libre, esta forma de secado requiere de un gran espacio abierto y largos tiempos de secado; aunque este método tradicional requiere sólo de una pequeña inversión, el secado a cielo abierto es altamente dependiente la disponibilidad de la luz del sol y es susceptible de contaminación por materiales extraños (polvo y arena) y

por infestaciones de insectos y hongos, que prosperan en la humedad, con estos factores se disminuye de manera importante la calidad del producto deshidratado. Otra forma de secado tradicional de productos agrícolas se lleva a cabo mediante la aplicación constante de calor relativamente bajo, quemando madera y combustibles fósiles en hornos, lo cual resulta costoso y daña al medio ambiente. Se puede además, combinar los sistemas de secado, es decir, utilizando la combustión de combustibles fósiles y la energía solar, reduciendo así la utilización de los primeros [3].

En la actualidad las tecnologías más comunes utilizadas en el secado solar son los secadores directos tipo gabinete, los indirectos que en su mayoría operan asistidos con calentadores solares y los mixtos que funcionan tanto directa como

indirectamente. Hay una gran diversidad de diseños y modos de operación: convección forzada directo [4], convección forzada indirecto [5], secadores directos e indirectos de gabinete [6], secador híbrido con biomasa solar potenciado por la técnica Co-Generación [7], secadores solares de invernadero [8-9], secador solar directo [11], calentador solar indirecto de convección natural con chimenea, secador solar tipo invernadero con colector solar, secador de túnel (con colector de aire), secador solar híbrido asistido por colectores de tubos evacuados [12], secador solar de deshumidificación [13], secador solar pasivo de modo mixto [14]; análisis de secador de invernadero, invernadero con plástico y semicilíndrico, secador solar de convección forzada integrado con sistema de almacenamiento de calor latente basado en cera de parafina [15], secador híbrido solar/térmico

combinado con secado de recuperación suplementario [7] secador solar asociado a un módulo fotovoltaico [16]; como puede observarse, esta gran diversidad de secadores solares y dispositivos complementarios buscan optimizar la eficiencia del proceso del secado.

## **SECADO SOLAR DE MAÍZ.**

En cuanto al secado solar de maíz, existen estudios experimentales de su secado y granos en general, por ejemplo, secadores solares indirectos a los que se adiciona un colector solar con almacenamiento térmico [17], así como estudios de los parámetros que intervienen en diferentes tecnologías de secado solar de cultivos entre ellos maíz. Tales como psicrometría del secado, condiciones ambientales, componentes con ventiladores y colectores solares; trabajaron con un

secadores tipo invernadero operado con convección natural y convección forzada [18], en este trabajo se realizó además un modelado de simulación para el rendimiento del secador propuesto; simulaciones que describen el proceso de secado dentro de un secador solar tipo chimenea para cultivos, entre ellos maíz [19], en este estudio los autores analizaron el efecto de variar la inclinación del techo de la cámara de secado encontrando que la simulación realizada puede servir como una herramienta efectiva para comparar y refinar los diseños de secadores para un rendimiento óptimo.

El secado de maíz es un proceso de gran importancia en la cadena de su producción debido a la alta demanda energética que requiere ya que al cosecharse su contenido de humedad es muy elevado, por lo que resulta difícil lograr su almacenamiento seguro

puesto que puede ser fácilmente atacado por microorganismos que deterioran su calidad. La energía es un producto caro y últimamente escaso, por lo tanto, resulta de suma importancia estudiar experimentalmente las características del proceso de secado solar de maíz utilizando secadores solares, con la finalidad de determinar la factibilidad técnica de su utilización en este proceso; se analizó el deshidratado del maíz en secadores directos tipo gabinete con convección natural y con convección forzada, debido a que esta tecnología solar es de muy fácil acceso para la comunidad en general, son económicos y requieren mínimo mantenimiento; se estudió también el secado a cielo abierto tradicional y se comparan además estos resultados con el secado en horno sin convección a temperaturas controladas. Adicional a lo anterior, se realiza un estudio del modelado matemático de las

tecnologías solares evaluadas que resultaron más eficientes con la finalidad de comprobar si el proceso de secado de este importante cultivo puede ser estimado.

En el apartado del estudio experimental se detallan los materiales utilizados y el método de trabajo llevado a cabo para la deshidratación del maíz, 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 y cielo abierto comparado con el deshidratado en un secador convencional con calentamiento eléctrico no convectivo a temperatura controlada en un rango de 45 °C y 55 °C. Finalmente, se concluye presentando los principales datos que experimentalmente llevan a determinar las condiciones y método de secado óptimo del deshidratado solar del maíz en función de las tecnologías evaluadas.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL

**Secador solar directo tipo gabinete con y sin convección.** Para el proceso de secado solar, se empleó un secador solar de tipo directo construido totalmente en material plástico transparente (acrílico) con una superficie de tratamiento de 0.5 m<sup>2</sup> cada uno. La cámara de secado solar consta

de una charola absorbadora de la radiación solar en donde se coloca el producto, se utilizaron dos cámaras de secado similares para la realización de las diferentes pruebas en forma simultánea. Las partes lateral, inferior y trasera están perforadas para permitir la circulación y extracción de aire caliente y húmedo. El SSD, tiene una cara frontal con una pendiente de 20° para aprovechar la radiación solar incidente y permitir la condensación y escurrimiento del agua. Consta además de perforaciones en las partes laterales, fondo y trasera, para permitir la circulación y extracción del aire húmedo caliente; 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<sup>-1</sup>.

#### **Secador no convectivo eléctrico.**

Para la obtención de la cinética de

secado, se utilizó un horno eléctrico marca Riossa sin convección. Durante las pruebas de secado se empleó un programa que permitió registrar la pérdida de peso de las muestras en las diferentes pruebas de secado, en el cual se variaron las temperaturas de secado en 45 °C y 55 °C.

**Materiales y Métodos.** La materia prima fue la mazorca que se produce en el Estado de Campeche, de la cual se extrajeron los granos para el proceso de muestra del secado tanto en fresco como en seco para las diferentes pruebas de medición de calidad del secado del maíz.

Para el secado solar se utilizaron dos SSD, tipo gabinete de manera simultánea, ambos con diferentes condiciones de operación: uno con circulación natural y el segundo SSD, funcionó con circulación forzada. En cada uno de ellos se registró la

temperatura interior y se pesaban las muestras testigo para determinar la pérdida de humedad. En cuanto al secado solar a cielo abierto, se fabricó una base cubierta con polietileno negro, sobre la cual se posicionaron varias piezas de elotes y se identificó una de ellas con la intención de tomarla como testigo obteniendo en esta pieza la cinética de secado. Para la determinación de las cinéticas de secado a temperaturas controladas se utilizó un horno no convectivo, y se determinaron las evoluciones de las pérdidas de peso.

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

La Figura 1 muestra los SSD utilizados. Los resultados obtenidos en ambos

secadores solares estudiados se compararon realizando a las muestras deshidratadas una cinética de secado, humedad final y actividad del agua.



**Figura 1** Secador solar directo tipo gabinete

### Instrumentación

**Determinación de humedad.** Para la determinación de la humedad se utilizaron dos balanzas con analizador de humedad, marca, Ohaus MB45, 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.

**Determinación de la actividad de agua ( $\alpha_w$ ).** 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 el grano fresco y posteriormente para el grano seco. 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.

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

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	MODELO	ERROR MÁXIMO
Radiación global	Piranómetro marca LI-COR	LI-200R	Azimet: $< \pm 1\%$ sobre 360o a 45o 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	$\pm 3o$
Anemómetro	Windsensor	P2546C-OPR	$\pm 0.3$ m/s

**Modelado en el proceso de secado.** Para analizar el comportamiento del proceso de secado de diferentes productos agrícolas, se ha estudiado previamente la modelización matemática de la cinética de secado solar directo con convección y sin convección. En la mayoría de estos modelos, el proceso de secado se considera isotérmico, y se consideró un mecanismo de transferencia de masa difusional. Se puede observar que la relación de humedad (MR) es una función del tiempo de secado y se puede calcular como:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde  $M$  es el contenido de humedad,  $M_e$  es la humedad de equilibrio (es el contenido de humedad de un material higroscópico después de haber estado expuesto a un ambiente bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa durante un período prolongado de tiempo) y  $M_0$  es la humedad inicial. Para el análisis matemático presentado se utilizó el programa Data Fit. En la Tabla 2 se muestran los modelos matemáticos evaluados.

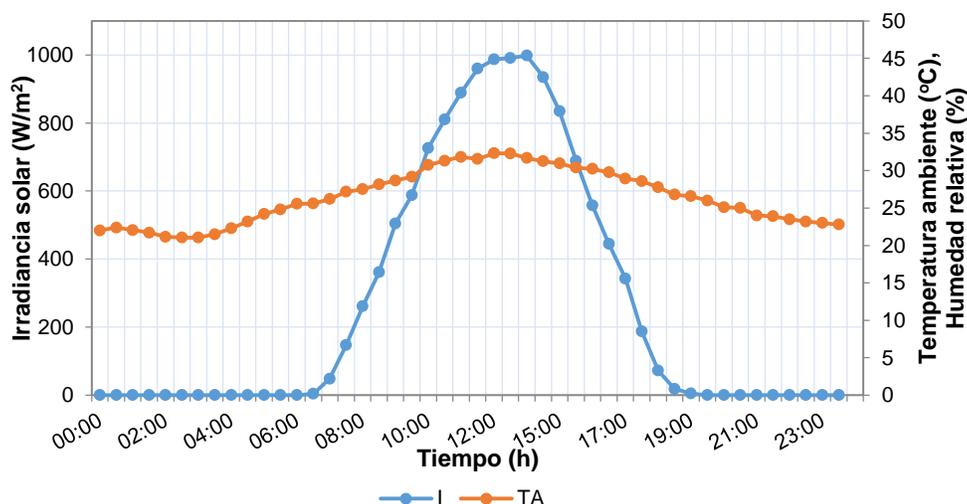
**Tabla 2.** Modelos matemáticos aplicados al proceso de secado solar.

MODELO	ECUACIÓN	REFERENCIA
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Tunde-Akintunde (2011)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Modified Page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Diamante & Munro (1993)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson & Pabis (1961)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Togrul & Pehlivan (2002)
Two-term	$MR = a \exp(-k_0t) + b \exp(-k_1t)$	Kouaa, et. al. (2009)
Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)$	Sharaf-Elden, et. al. (1980)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang & Singh (1978)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

El estudio experimental del secado solar del maíz se llevó a cabo en el Laboratorio de Secado Solar ubicado en la Plataforma Solar de la Facultad de Ingeniería de la UAC, ubicado en la ciudad de San Francisco de Campeche,

Campeche; el período de pruebas fue del 24 de octubre al 9 de diciembre del 2016. En la Figura 2 se muestra el comportamiento de los parámetros climáticos obtenidos con la estación meteorológica, se toma como referencia un día soleado del periodo de pruebas (2 de diciembre).



**Figura 2.** Evolución de la Irradiación global, temperatura ambiente el 2 de diciembre del 2016.

Como puede observarse en la Figura anterior, la irradiación global máxima alcanzada en este día se midió en 980

W/m<sup>2</sup>, los valores máximos promedio de los días bajo estudio variaron entre 980 W/m<sup>2</sup> y 844.8 W/m<sup>2</sup>. De igual forma se

puede analizar que los valores mínimos de la temperatura ambiente fluctuaron entre 23.5 °C y 24.6 °C, mientras que los valores promedio máximos medidos variaron entre 29.0 °C y 34.3 °C.

Se presentan en la Tabla 3 las humedades iniciales y finales y de actividad del agua del maíz fresco y seco. Se llevaron a cabo tres experimentos con cada una de las temperaturas seleccionadas.

**Tabla 3.** Humedades (%) y actividad del agua (aw) en secador solar con convección horno eléctrico.

MUESTRA	HUMEDAD (%)		aw	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Secador solar no convectivo	85.3	11.50	0.91	0.39
Secador solar convectivo	80.5	12.41	0.97	0.42
Cielo abierto	83.8	11.73	0.95	0.49
Horno 45 °C	86.5	13.71	0.97	0.46
Horno 55 °C	84.7	12.50	0.92	0.33

En la tabla anterior se puede observar que las humedades iniciales cambiaron muy poco en cada tecnología estudiada, por otro lado, las humedades finales fueron muy similares a las obtenidas en los productos comerciales entre 12 % y

13 %. De igual forma se puede observar que los incrementos de humedad obtenidos en cada prueba prácticamente fueron los mismos e independientes del tipo de funcionamiento en los secadores de

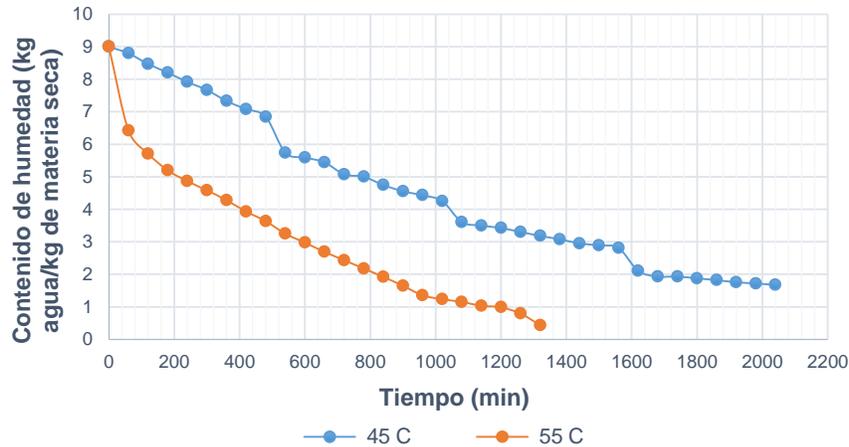
gabinete, las diferencias en actividad del agua tuvieron este mismo comportamiento. De acuerdo con los resultados en la actividad del agua final en todas las tecnologías evaluadas, prácticamente se está garantizando que el ambiente tendrá nulo efecto nocivo sobre las muestras deshidratadas obtenidas.

### **Secado convectivo a condiciones controladas**

Se llevaron a cabo pruebas de secado del maíz en condiciones controladas a 45 °C y a 55 °C con la finalidad de llevar a cabo un comparativo de los resultados obtenidos en el grano de maíz en cuanto al grado de disminución de sus propiedades, deterioro físico del grano y

tiempo de secado a diferentes temperaturas. Se eligieron estas temperaturas debido a que los secadores solares directos con y sin convección alcanzaron estas temperaturas bajo condiciones reales de operación; los resultados experimentales por si solos deberán proporcionar una evaluación y correlación directa entre ambas tecnologías (secado solar vs secado convencional). Se llevaron a cabo tres experimentos con cada una de las temperaturas seleccionadas.

La Figura 3 representa el comportamiento del contenido de humedad 45 °C y 55 °C obtenidas en el horno eléctrico.

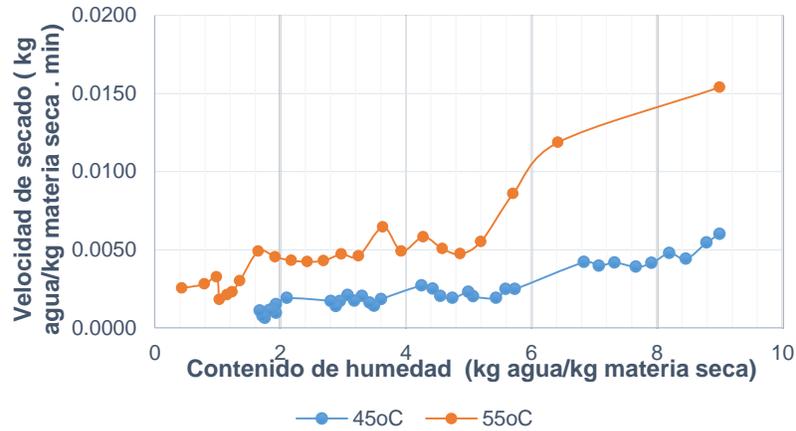


**Figura 3.** Contenido de humedad en condiciones controladas a 45 °C y 55 °C en el horno eléctrico

Como se puede observar en la Figura 3, la curva a 45 °C muestra una menor pérdida de humedad con un tiempo de secado de alrededor de 35 horas sol. La cinética a 55 °C, es la más corta, con 23 horas sol. La Figura 4, representa las evoluciones de la velocidad de secado en función del contenido de humedad para cada una de las temperaturas de secado analizadas en el horno eléctrico. En el intervalo de 45 °C a 55 °C. Se presentaron las velocidades más

altas y a 55 °C, sólo se obtuvo un periodo de velocidad decreciente, sin embargo a 45 °C, se observaron un periodo de velocidad, pero prácticamente el comportamiento fue constante dicho periodo se observa entre los intervalos de contenido de humedad en base seca de 8.5 y 5.7 para 45 °C. En el caso de 55 °C se ubica la pendiente más pronunciada primero a los 6.3 y después a 4.9.

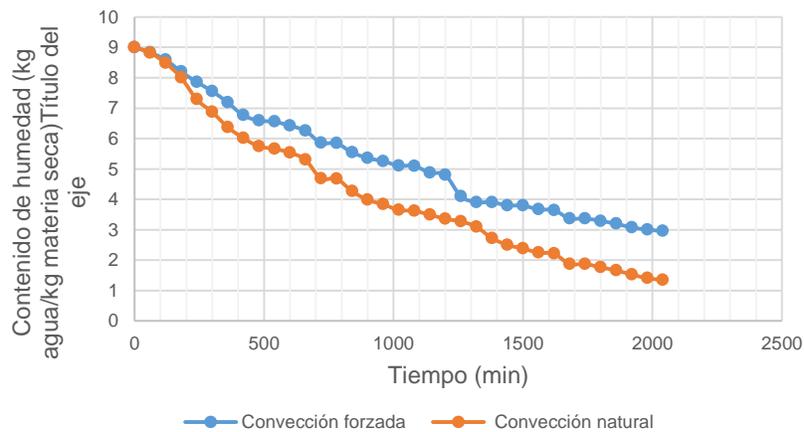




**Figura 4.** Velocidad de secado en función del contenido de humedad en condiciones controladas a 45 °C y 55 °C en el horno eléctrico

## Secado solar con y sin convección en secador solar directo

Se puede observar en la Figura 5, el contenido de humedad en función del tiempo que se presentó con el secador solar convectivo y sin convección.

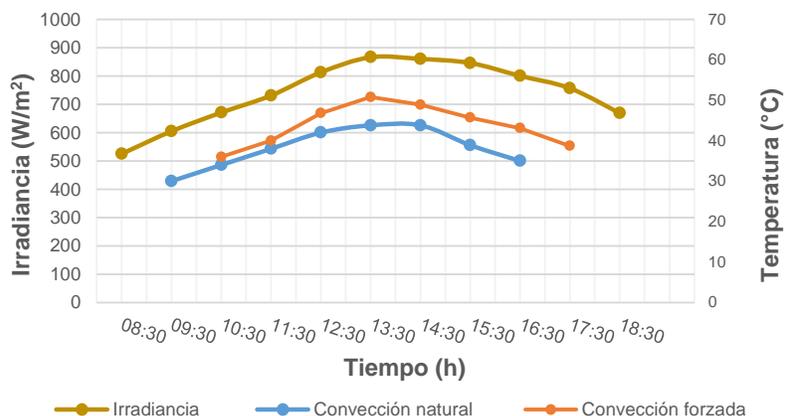


**Figura 5.** Contenido de humedad vs tiempo de secado con los secadores solares con y sin convección forzada.

Al analizar la figura 5 se observa que el contenido de humedad en el caso de sin convección es mucho más rápido que la de convección. Lo anterior se explica debido a que se tiene una mayor temperatura en convección natural, debido a la baja movilidad del aire dentro de la cámara de secado, sin embargo, en ambos casos los tiempos para alcanzar la humedad de

equilibrio son similares, 31.8 h y 40 h sol respectivamente.

En la Figura 6 se presenta un comparativo de la irradiancia recibida en el día tomado como referencia durante las horas con sol y las temperaturas obtenidas dentro de las cámaras de secado del secador solar convectivo y sin convección.

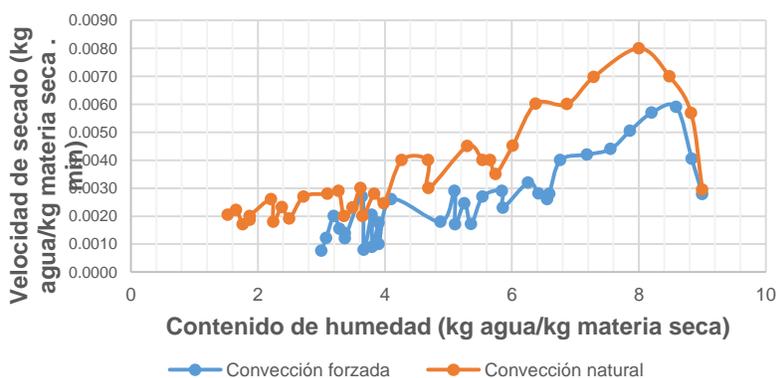


**Figura 6.** Comparativo de irradiancia y temperaturas en las cámaras de secado

Se puede ver en la Figura anterior que tanto las temperaturas dentro de la cámara de secado del secador convectivo como del secador sin convección son muy uniformes en el transcurso del día, sin embargo, es muy notorio que el secador sin convección forzada alcanza mayores temperaturas que el secador con convección. En el primer

caso las temperaturas alcanzadas variaron de 40 °C a 55 °C, mientras que en el segundo caso se presentaron variaciones de 30 °C a un máximo de 40 °C.

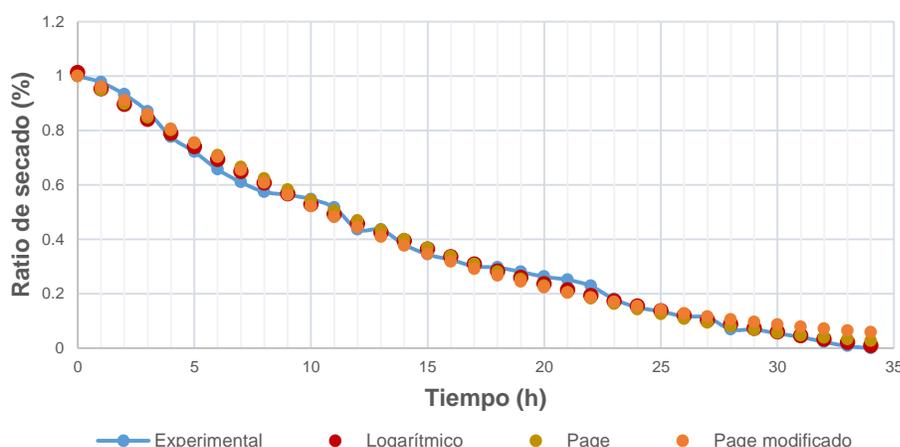
La Figura 7 presenta las velocidades de secado obtenidas en función del contenido de humedad de las muestras analizadas.



**Figura 7.** Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en los secadores solares directos tipo gabinete

La variación de las velocidades de secado en cada uno de los secadores directos en función del contenido de humedad se muestran en la Figura anterior. En ambos casos no se observó ningún periodo de velocidad constante, siendo la velocidad más alta la de convección natural con un valor de 0.080 con una temperatura máxima de 52°C y un tiempo de secado de 33 horas. En el caso del secado eléctrico a 55 °C, la velocidad máxima alcanzada fue de 0.037 en un tiempo de secado de 43 horas.

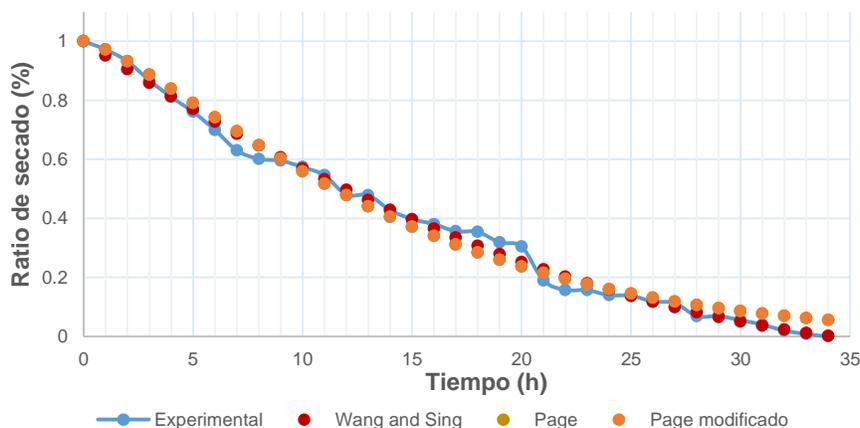
La Figura 8, presenta los datos experimentales para el secado solar directo de la relación de humedad frente al tiempo de secado ajustado con los modelos exponenciales Logarítmico, Page y Page modificado. De igual forma, la Figura 9 presenta la cinética de secado experimental del secado directo solar con convección forzada equiparado con los modelos modificados de Wang & Sing, Page y Page [20-21] dichos modelos se ajustaron más al proceso de secado solar considerando los 9 modelos evaluados.



**Figura 8.** Datos experimentales del ratio de secado versus tiempo de secado usando secado solar directo con convección natural (modelos Logarítmico, Page y Page modificado).

Como se mencionó anteriormente, los modelos Logarítmico, Page y Page modificado dieron los mejores resultados para el secado solar directo con secador solar tipo gabinete con convección natural, con un  $r^2$  de 0.9920, 0.9478 y 0.9892, respectivamente, y  $\chi^2$  de 0.0001 para los tres modelos. Para el caso del secado solar

directo, con convección forzada, los modelos Wang & Sing, Page y Page modificado proporcionaron los mejores resultados, con un  $r^2$  de 0.9936, 9853 y 9853, respectivamente; y  $\chi^2$  de 0.00012. Por lo tanto, el contenido de humedad en cualquier momento durante el proceso de secado podría ser estimado confiablemente.



**Figura 9.** Datos experimentales del ratio de secado versus tiempo de secado usando secado solar directo con convección natural (modelos Wang & Sing, Page y Page modificado).

### Secado solar a cielo abierto

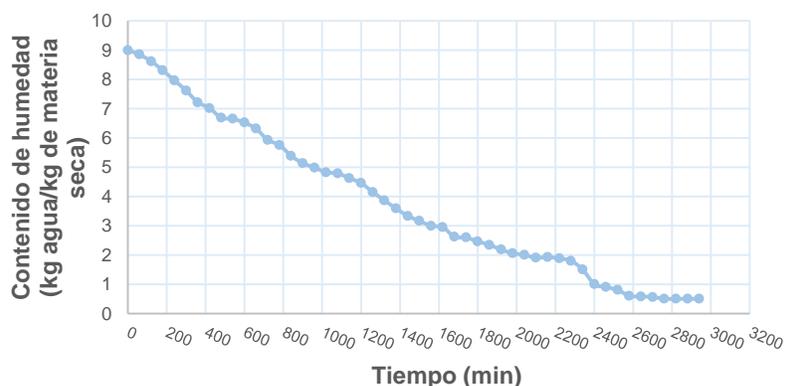
Otra tecnología convencional utilizada comúnmente en nuestro país es el secado solar a cielo abierto, por lo tanto, se llevó a cabo un estudio exhaustivo del secado del maíz por este medio. Se puede observar en

la Figura 8 el contenido de humedad obtenido en el maíz en función del tiempo.

En el caso del estudio del secado a cielo abierto, se analizaron cuatro muestras de elote y se ubicaron estratégicamente en diferentes espacios dentro del área de

secador solar procurando abarcar todo el espacio posible para su estudio. El secador solar a cielo abierto depende en gran medida del efecto combinado de la temperatura, la humedad y la velocidad del

aire, siendo la más importante la humedad relativa. Esta característica se marcó de manera importante al obtener mediante esta tecnología la más larga cinética de secado en comparación del resto (Figura 8).

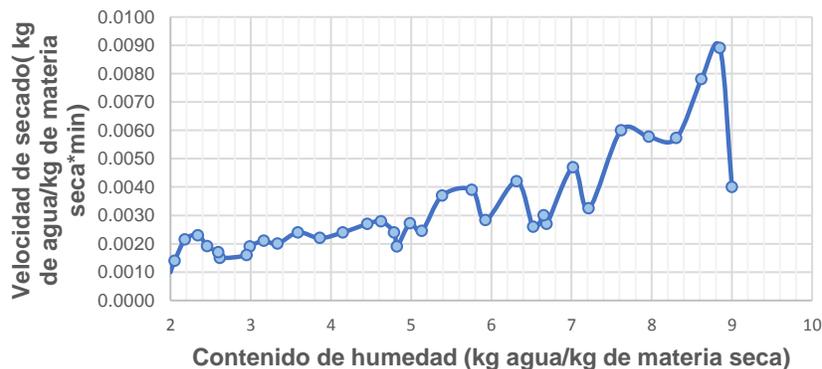


**Figura 8.** Evolución del contenido de humedad en el secador solar a cielo abierto.

Al observar la tendencia de la curva del gráfico anterior, se puede notar que esta es muy consistente, sin embargo, a diferencia de los casos anteriores, se logró alcanzar la humedad óptima (10 %) en mucho más tiempo, en promedio se obtuvo la mejor cinética en cerca de 50 horas, esto se debe a la exposición directa del producto a las condiciones medioambientales, además, se

debe considerar que, al mismo tiempo, dicho producto se expone a diferentes tipos de contaminación como es polvo, insectos, etc., lo que afecta negativamente a la calidad e inocuidad del producto final.

Se presenta en la Figura 9 la velocidad de secado en función del contenido de humedad en el secador solar a cielo abierto.



**Figura 9.** Variación de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en el secador a cielo abierto.

En los cuatro casos estudiados a cielo abierto sólo se observó un período de tasa descendente. Como se puede ver, la velocidad de velocidad de secado disminuye muy lentamente prácticamente durante todo el proceso de secado, este comportamiento se observa desde un valor de 7.5 y hasta 2.0, al inicio desciende relativamente rápido, desde el valor de 9.0 y hasta 7.5 aproximadamente, adicional a esto, se observa que la tasa de secado en este tipo de secado fue muy lenta debido principalmente, como ya se mencionó anteriormente este comportamiento fue debido a las condiciones ambientales, ya

que el exceso de contenido de humedad no favoreció la pérdida de humedad.

## CONCLUSIONES

El secado directo convectivo mostró ser la mejor de las condiciones con un tiempo de operación de 32 horas sol, en cuanto a un mejor control de las condiciones de funcionamiento y una mayor protección contra los efectos de la temperatura y la exposición directa a la radiación solar ya que mejoró la calidad final del grano del maíz y redujo el efecto de decoloración, sin embargo, requiere más consumo de energía eléctrica. Operando el secador solar directo

con convección natural, se obtuvieron temperaturas de operación más altas que operando en convección forzada y por lo mismo, los tiempos de secado fueron más cortos, 40 horas sol. El secado a cielo abierto es el más sencillo y económico, pero no es recomendable debido al exceso del tiempo de secado y a la nula calidad de higiene del producto final. El tiempo de secado con convección natural resulto muy semejante en todos los casos a los tiempos de secado en horno eléctrico a 45 °C, lo cual resulta de mucha importancia en lo referente al ahorro energético en la industria del deshidratado de alimentos y en este caso en particular, del maíz.

Los modelos Logarítmico, Page y Page modificado proveyeron los mejores resultados para el secado solar directo con secador solar tipo gabinete con convección natural, resultando un  $r^2$  de 0.9920, 0.9478 y 0.9892, respectivamente; y para el caso del secado solar con convección forzada, con los modelos Wang & Sing, Page y Page modificado se obtuvieron los mejores

resultados, con un  $r^2$  de 0.9936, 9853 y 9853, respectivamente; con estos resultados queda comprobado que el contenido de humedad en cualquier momento durante el proceso de secado podría ser estimado de manera confiable.

Se demostró la viabilidad técnica del secado solar del maíz y se comprobó que con la tecnología de secado con secador solar tipo gabinete se obtiene una economía energética importante, contribuyendo además de esta forma en la reducción del impacto ambiental al disminuir el uso de combustibles fósiles en el proceso de secado.

## REFERENCIAS

- [1] FAO (Food Agriculture Organization). 2016. Perspectivas Agrícolas OCDE-FAO 2016-2025. <http://www.fao.org/3/a-i5778s.pdf>
- [2] Oztekin, S., Bascetincelik, A., & Soysal, Y. (1999). Crop drying programme in Turkey. *Renewable Energy*, 16, 789–794
- [3] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyar, Ranko Goic (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), 2652–2670
- [4] Ahmad F., Kamaruzzaman S., Mohammad H. Y., Mohd H. R., Mohamed G., and Hussein A. K. (2014). Performance analysis of solar drying system for red chili. *Solar Energy*. 99 47-54
- [5] Bahloul N, Boudhrioua N, Kouhila M, Kechaou B (2009) Effect of convective solar drying on colour, total phenols and radical scavenging activity of olive leaves (*Olea europaea* L). *Int J Food Sci Technol* 44: 2561-2567
- [6] Banout J, Havlik J, Kulik M, Kloucek P, Lojka B. (2010) Effect of solar drying on the composition of essential oil of sacha culantro (*Eryngium foetidum* L) grown in the peruvian amazon. *J Food Process Eng* 33: 83-103
- [7] Tadahmun A. Y., and Hussian H. A. (2016). Experimental investigation and evaluation of hybrid solar/thermal dryer combined with supplementary recovery dryer. *Solar Energy*. 134, 284-293
- [8] Abdullah K. (1997) Drying of vanilla pods using a greenhouse effect solar dryer. *Dry Technol* 15. 685-698
- [9] Bechoff A, Dufour D, Dhuique-Mayer C, Marouzé C, Reynes M, et al. (2009) Effect of hot air, solar and sun drying treatments on provitamin a retention in orange- fleshed sweet potato. *J Food Eng* 92: 164-171
- [10] Hii CL, Abdul Rahman R, Jinap S, Che Man YB (2006) Quality of cocoa beans dried using a direct solar dryer at different loadings. *J Sci Food Agri* 86: 1237-1243
- [11] Jairaj K. S., Singh S. P., and K. Srikant (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy*. 83, 1698-1712
- [12] Yahya M, Othman MY, Sopian K, Daud WRW, Yatim B, et al. (2004) Quality of pegaga leaf dried in a solar assisted dehumidification drying system
- [13] Mehdizadeh Z, Zomorodian A (2009) A study of the effect of solar drying system on rice quality. *J Agricultur Sci Technol* 11: 527-534.
- [14] Rabha D.K. and Muthukumar P. (2017). Performance studies on a forced convection solar dryer integrated with paraffin wax-based latent heat storage system. *Solar Energy*. 149 214-226.
- [15] Chen HH, Hernandez CE, Huang TC (2005) A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energ* 78: 97-103.
- [16] Dilip Jain, Pratibha Tewari (2015). Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renewable Energy* 80: 244-250.
- [17] Om Prakash, Anil Kumar (2015). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29, 905-910.
- [18] J.K.Afriyie, H.Rajakaruna, M.A.A.Nazha, F.K.Forson (2013).

---

Mathematical modelling and validation of the drying process in a Chimney-Dependent Solar Crop Dryer. Energy Conversion and Management. 67, 103-116.

[20] Wang, C., Singh, R.A., 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE

Paper. St. Joseph. MI: American Society. Agri. Eng. 78, 3001.

[21] Page, G., 1949. Factor Influencing the Maximum Rates of Air-drying Shelled Corn in Thin Layer. Master Thesis. Perdue University, USA.

