 ISSN 2007-8102

Efecto de la temperatura sobre la cinética de secado de la penca de *Agave angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha.*

Barojas Zavaleta, J. E.[1], Castillo Juárez, A.[1], Del Ángel Zumaya, J. A.[1], Gonzales Jiménez, F. E.[1], Jiménez Guzmán, J.[1]

[1]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Ote. 9 Col. Rafael Alvarado C. P.

94340 Orizaba, Veracruz, México.

Área de participación: Ingeniería Química

Resumen

Se evaluó la cinética de secado de la penca de *Agave angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha* que representan productos de desecho del procesamiento de mezcal y tequila a 70, 90 y 110°C a una velocidad constante de aire de 1.25 m/s. La de velocidad de secado oscilo entre 0.0001-0.0016 y 0.0002-0.0016 para la *Agave angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha* respectivamente. Los tiempos de operación de secado para alcanzar la humedad objetivo (0.06 KgH_2O/Kg_{ss}) fueron de 690, 270 y 150 minutos a las temperaturas de 70, 90 y 110°C respectivamente para el *Agave angustifolia Haw* y de 720, 270 y 210 minutos para el *Agave mexicano Rhodacantha*. La difusividad de humedad efectiva (D_{ef}) oscilo entre 2.231E-10 y 9.501E-10 m^2/s para la penca de *Agave angustifolia Haw* y 3.439E-10 - 1.217E-09 para la penca de *Agave mexicano Rhodacantha*.

Palabras clave: *Agave mexicano Rhodacantha, Agave angustifolia Haw,* secado, coeficiente de difusión.

Abstract

The kinetics of drying of the leaves of *Agave angustifolia Haw* and *Mexican Agave Rhodacantha*, which represent waste products from the processing of mezcal and tequila, were evaluated at 70, 90 and 110 ° C at a constant air speed of 1.25 m / s. The drying speed ranged between 0.0001-0.0016 and 0.0002-0.0016 for *Agave angustifolia Haw* and *Mexican Agave Rhodacantha* respectively. The drying operation times to reach the target humidity (0.06 $KgH_2O/Kg_{ss.}$) were 690, 270 and 150 minutes at temperatures of 70, 90 and 110 ° C respectively for Agave angustifolia Haw and 720, 270 and 210 minutes. for the *Mexican Agave Rhodacantha*. The effective moisture diffusivity ranged between 2.231E-10 and 9.501E-10 m^2 / s for the *Agave angustifolia Haw* stalk and 3.439E-10 - 1.217E-09 for the *Mexican Agave Rhodacantha* stalk.

Key words: *Mexican agave Rhodacantha, Agave angustifolia Haw***,** dried, diffusion coefficient.

Introducción

Los Agaves representan una amplia importancia económica y ecológica por su amplia adaptación a una gran diversidad de ecosistemas. Las *agaváceas* presentan una alta variedad de especies reportándose un total de 211 en la literatura, siendo México su país de origen [1]. En el territorio mexicano, para la producción de licores tradicionales a partir de las pencas de *Agave angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha* en promedio se aprovecha entre el 50 y 60 % del agave para la producción de mezcal [2]. En 2020 la producción agrícola total de agave en el territorio nacional mexicano fue de 1,913,025.96 toneladas [3] de las cuales se estima que un 40 % corresponde a los desechos agroindustriales generados por este sector constituyendo esto un problema ambiental. [5,6]. De esta manera, estos desechos agroindustriales representan un alto potencial para su utilización como subproductos por sus características biológicas y elevado potencial nutricional para su incorporación como posibles ingredientes alimenticios. Dado que son una fuente importante de fibra y metabolitos secundarios pueden contribuir a lo antes mencionado por lo cual el estudio del

Registro ISSN en trámite ante INDAUTOR 1007

 ISSN 2007-8102

procesamiento de estos subproductos vegetales es indispensable para evaluar sus propiedades funcionales en la industria alimenticia o ganadera. Por lo que en el presente proyecto se estudió el efecto de la temperatura sobre la deshidratación de las pencas de *Agave angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha* para la viabilidad de las mejores condiciones de operación.

Metodología

Equipo

Para la presente investigación fue utilizado un secador por charolas de circulación de aire forzada marca Intertecnica, S.A. (Figura 1), con cámara metálica rectangular, soportes móviles donde se apoyan los bastidores. Las persianas ajustables mantienen un flujo de aire sobre las bandejas y mediante un regulador de tiro ajustable se controla la proporción de aire recirculado.

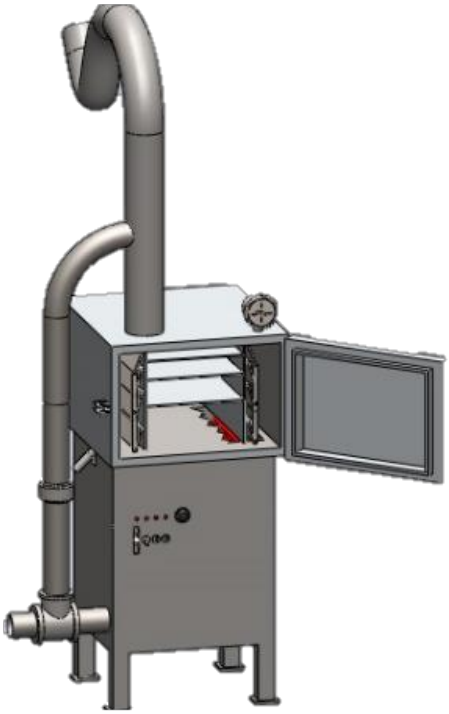


Figura 1. Secador por charolas

Acondicionamiento de la penca

En el presente estudio se evaluaron dos especies de penca de agave: agave espadín (*Agave Angustifolia Haw*) y agave mexicano silvestre (*Agave mexicano Rhodacantha*), originarias de El Trapiche, localidad perteneciente al municipio de Santa Cruz Mixtepec con coordenadas 16°47' latitud norte, 96°53' longitud oeste, Oaxaca, México.

Para facilitar el manejo de las dos variedades de agave a estas se les retiraron las espinas, posterior a esto y con la finalidad de asegurar un secado homogéneo, así como una superficie de contacto constante las pencas de agave fueron cortadas en tamaños iguales con una longitud de 10 cm por un ancho de 5 cm con un grosor de 2 mm.

Curva de secado y determinación de humedad de equilibrio

A partir de las curvas de secado se determinó la humedad de equilibrio, tomando una muestra del secador cada 30 minutos durante el tiempo de secado para las diferentes temperaturas de operación

 Registro ISSN en trámite ante INDAUTOR 1008

 ISSN 2007-8102

(70, 90 y 110°C) con una velocidad del aire de secado de 1.25 m/s constante. A partir de los datos obtenidos del análisis de humedad que se realizó de acuerdo con el método descrito por la AOAC [7], se determinó el tiempo de operación requerido para la producción de harina de maguey con una humedad en base seca de 0.06 para las temperaturas ya mencionadas.

Determinación del coeficiente de difusividad efectiva

El secado fue evaluado a partir de la curvas experimentación a partir del modelo de Fick descrito con la ecuación 1.

$$X^* = \frac{X^* - We}{W_0 - We} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 n^2 D_{ef}{}^t}{4H^2}\right) \qquad \text{Ec. } \mathbf{1}$$

En donde X* es la humedad incumplida (g/g), We es humedad de equilibrio (g/g), W_0 es la humedad inicial (g/g), H es el espesor de desecho o placa (m), D_{ef} es el coeficiente de difusividad efectiva (m^2 /s) y t es el tiempo (s). Para el análisis se consideró que la placa plana es infinita, no se consideró el encogimiento del subproducto y resistencia a la transferencia de masa, así mismo la difusividad efectiva es constante.

La transferencia de masa se encuentra definida por la ecuación 2, dicha ecuación frecuentemente se aplica para el análisis de los productos agrícolas [8].

$$X^* = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{ef}{}^t}{4H^2}\right) \qquad \text{Ec. } \mathbf{2}$$

Se aplicaron propiedades de los logaritmos a la ecuación 3, donde al graficar el logaritmo natural de humedad incumplida (Ln X*) en función del tiempo se obtiene un modelo lineal para calcular la difusión efectiva.

$$\text{Ln } X^* = \frac{8}{\pi^2}\left(-\frac{\pi^2 D_{ef}}{4H^2}t\right) \qquad \text{Ec. } \mathbf{3}$$

El coeficiente de difusividad efectiva (D_{ef}) interviene en los fenómenos de transferencia de masa a través del procesos de convección y difusión que se dan del interior del sistema al ambiente [9], este parámetro se evalúa a partir del ajuste del modelo matemático de los resultados experimentales. En base a esto la se entiende como D_{ef} a la disposición que tiene el agua para migra del sistema [10].

Una vez que se simplifica la Ec.3 a la Ec.4 se resuelve para obtener la difusividad de humedad efectiva.

$$\text{Ln } X^* = \left(-\frac{\pi^2 D_{ef}}{4H^2}t\right) \qquad \text{Ec. } \mathbf{4}$$

 Registro ISSN en trámite ante INDAUTOR 1009

 ISSN 2007-8102

Resultados

Curva de secado y determinación de humedad de equilibrio

Las curvas de secado se representan en la Figura 2 y 3 para las variedades de *Agave angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha* respectivamente a cada temperatura de operación (70, 90, 110°C), a partir de estas curvas se obtuvo el tiempo requerido de secado para alcanzar la humedad objetivo (0.06 KgH_2O/Kg_{ss}), requiriendo un tiempo de operación de secado para el *Agave angustifolia Haw* de 690, 210 y 150 minutos para las tres temperaturas (70, 90, 110°C) de secado respectivamente, por otro lado el tiempo requerido de secado para el *Agave mexicano Rhodacantha* fue de 720, 270 y 210 minutos para las tres temperaturas (70, 90, 110°C) de secado respectivamente.

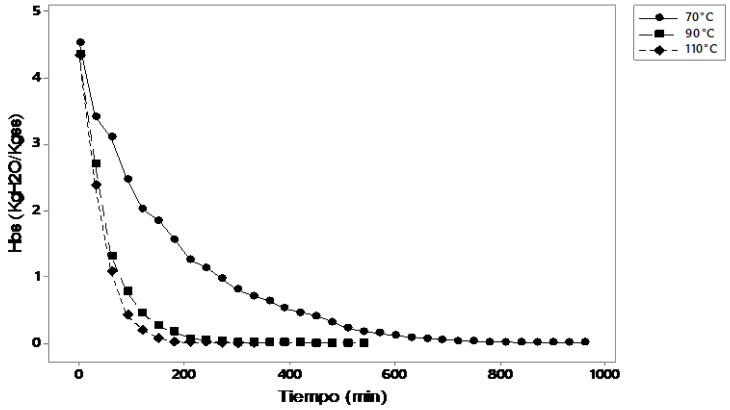


Figura 2. Curva de secado a las diferentes temperaturas del contenido de humedad de equilibrio del *Agave angustifolia Haw.*

El equilibrio de humedad se determino a partir de las curvas de secado previamente antes mencionadas (Tabla 1) para ambas especies de agave a cada temperatura de secado. Para evaluar de manera correcta el D_{ef} a partir del modelo de Fick se debe realizar un adecuado calculo de la humedad de equilibrio para cada temperatura. Dado que, si experimentalmente no se alcanza el valor antes mencionado siendo este valor muy alto, al momento de normalizar la curva el calculo de la pendiente se ve perturbado afectando la linealidad de la curva normaliza [11].

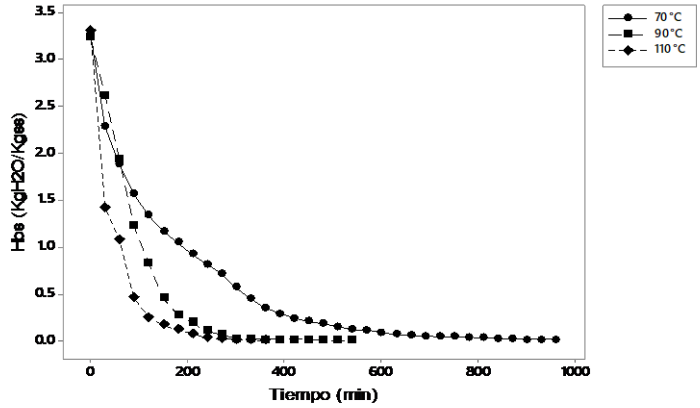


Figura 3. Curva de secado para la obtención de la humedad de equilibrio de la *Agave mexicano Rhodacantha.*

 Registro ISSN en trámite ante INDAUTOR 1010

 ISSN 2007-8102

El contenido de humedad de equilibrio de ambas variedades de agave encontradas en la presente investigación presentó un comportamiento similar, el contenido de humedad de equilibrio decreció con el aumento de la temperatura de secado, lo anterior coincide con lo reportado por Jiménez-Guzmán [12] quien presento el mismo comportamiento en el secado de café pergamino.

Tabla 1. Contenido de humedad de equilibrio para cada temperatura.

Variedad de agave	W_o (KgH_2O/Kg_{ss})	We (KgH_2O/Kg_{ss})		
		70°C	90°C	110°C
Agave angustifolia Haw	4.54 ±0.047	0.0105 ±0.0001	0.0040± 0.0002	0.0014 ±0.0001
Agave mexicano Rhodacantha	3.16 ±0.078	0.0112± 0.0002	0.0047± 0.0004	0.0020± 0.0001

Velocidad de secado

Las curvas presentadas en la Figura 4 y 5 revelan que la perdida de humedad respecto al tiempo se da de forma no lineal, dicho fenómeno indica que el secado de la penca de los Agaves *angustifolia Haw* y *Agave mexicano Rhodacantha* se controla por la difusión [13].

En dichas curvas puede apreciarse que la velocidad de secado para obtener la humedad objetivo (0.06 KgH_2O/Kg_{ss}) se comporta de manera diferente para cada temperatura de operación, así como también para cada especie de agave, observándose un aumento en la velocidad de secado al incrementar la temperatura de operación. La disminución más rápida de humedad observada durante la experimentación podría atribuirse al aumento de la temperatura ya que el aumento de esta da lugar a la aceleración de movimiento de las moléculas de agua, otra razón que podría explicar la aceleración de secado con el aumento de la temperatura podría ser la modificación morfológica de la penca de agave como la formación de poros que facilitan la migración de la humedad [13–15].

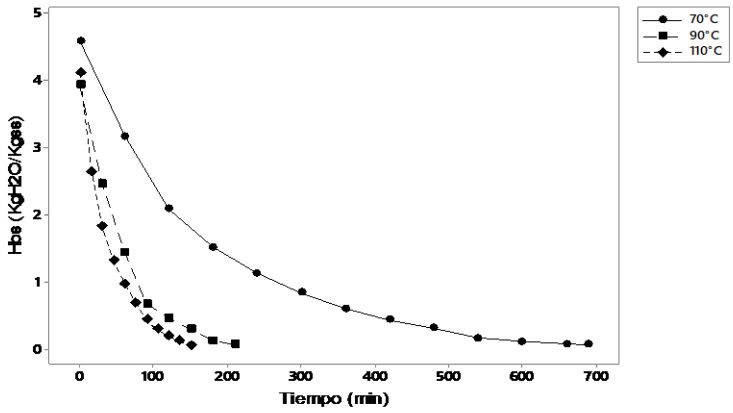


Figura 4. Curva de secado contenido de humedad (KgH_2O/Kg_{ss}) respecto al tiempo de *Agave angustifolia Haw.*

Para la obtención de la velocidad de secado las Figuras 3 y 4 fueron ajustadas a un polinomio los cuales fueron derivados para la obtención de la velocidad de secado en función a la pendiente de

 Registro ISSN en trámite ante INDAUTOR 1011

 ISSN 2007-8102

las curvas *dx/dt* respecto al contenido de humedad (KgH_2O/Kg_{ss}) para cada especie de agave a las temperaturas de secado evaluadas.

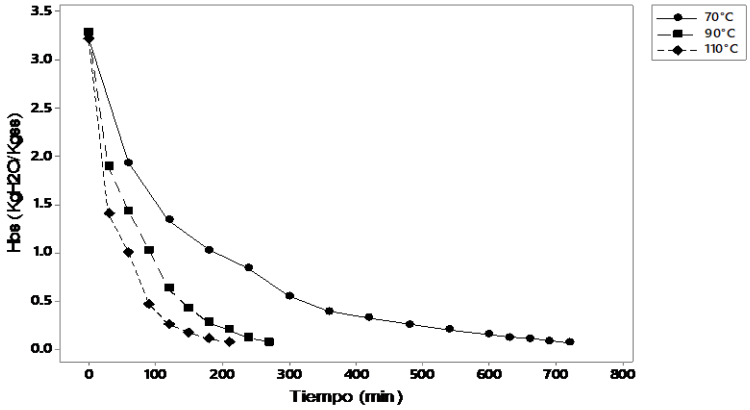


Figura 5. Curva de secado del contenido de humedad (KgH_2O/Kg_{ss}) respecto al tiempo de *Agave mexicano Rhodacantha.*

Como se observa en la Tabla 2 la velocidad de secado está influenciada por el aumento de la temperatura, observándose que a mayor temperatura se obtiene un incremento de la velocidad de secado, de esta manera se entiende que el aumento en la temperatura de operación incrementa la fuerza impulsora que da lugar a un mayor movimiento de las moléculas de agua.

Tabla 2. Valores de velocidad de secado en función a la pendiente de las curvas dx/dt respecto al contenido de humedad (KgH_2O/Kg_{ss}) para cada tratamiento.

Variedad de agave	Valor de la pendiente		
	70°C	90°C	110°C
Agave angustifolia Haw	0.0001 ± 0.0003	0.0006 ± 0.0002	0.0016 ± 0.0001
Ahave mexicano Rhodacantha	0.0002 ± 0.0001	0.0008 ± 0.0002	0.0016 ± 0.002

En la Figura 6 se presentan ilustraciones que corresponden a las pencas de agave frescas, durante el procesamiento de estas y deshidratas a 70 y 110°C respectivamente apreciándose una diferencia final en apariencia como consecuencia de la temperatura de operación.

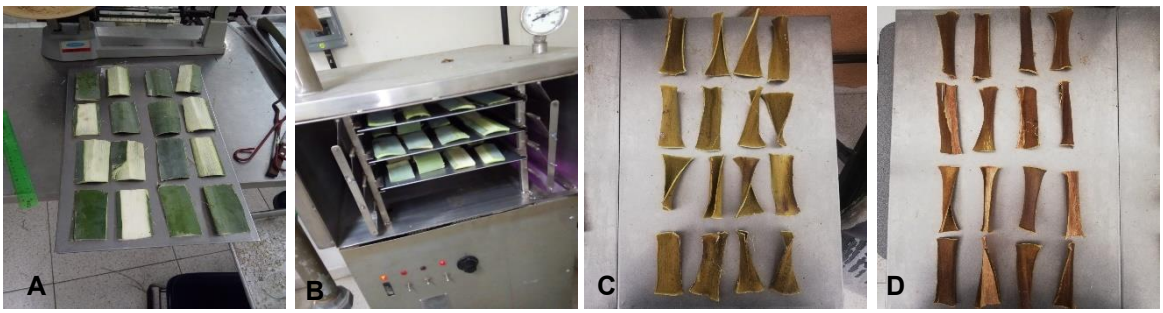


Figura 6. Pencas de agave; frescas (A), procesamiento de las pencas de agave (B), pencas deshidratadas a 70°C (C), penca deshidratada a 110°C (D)

 Registro ISSN en trámite ante INDAUTOR 1012

Coeficiente de difusividad efectiva

En el secado de alimentos el D_{ef} representa la disposición que tiene el agua para migrar del sistema y se obtiene de los datos experimentales donde se aplican el modelo de Fick como se muestra en la Ec. 1 [16,17]. Por lo tanto, el D_{ef} se calculó al graficar el Ln X* vs tiempo a partir de su pendiente (Tabla 3) donde se presentan los resultados promedios del D_{ef} de las diferentes temperaturas de evaluadas, observándose una evidente relación del coeficiente de difusión con la temperatura, esto al evidenciarse un aumento del coeficiente de difusión con el aumento de la temperatura de secado como se esperaba. Los coeficientes de difusividad encontrados para las pencas de ambas variedades de agave se encuentran dentro del intervalo propuesto para los sistemas alimentarios [18].

Tabla 3. Coeficientes de difusión efectiva para cada temperatura

Variedad de agave	D_{ef} [m^2/s]		
	70°C	90°C	110°C
Agave angustifoli Haw	2.231E-10 ± 2.544E-12 [e]	6.946E-10 ± 5.089E-12 [c]	9.501E-10 ± 1.526E-11 [b]
Agave mexicano Rhodacantha	3.439E-10 ± 2.783E-12 [d]	9.327E-10 ± 9.354E-12 [b]	1.217E-09 ± 9.354E-12 [a]

Los resultados se expresan como la media ± desviación estándar (n =3). Las medias que no comparten una letra en una misma columna son significativamente diferentes (Tukey, $p<0.05$).

Trabajo a futuro

Al polvo obtenido a las diferentes condiciones de secado (70, 90 y 110°C) y de ambas variedades de agave, se le están realizado determinaciones fisicoquímicas, funcionales (capacidad de absorción de agua y grasa, capacidad emulsificante, de hinchamiento, espumante y solubilidad) y tecno-funcionales (propiedades del flujo del polvo) con la finalidad de obtener un ingrediente funcional con potencial aplicabilidad dentro de un sistema alimentario.

Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede concluir que las cinéticas de secado de las pencas de agave se encuentran altamente influenciadas por la temperatura, obteniendo tiempos prolongados de secado a menores temperaturas. El modelo de Fick describió satisfactoriamente los datos experimentales del proceso de secado validando su utilización para el estudio del secado de la penca de *Agave angustifolia Haw* y *mexicano Rhodacantha*. Los coeficientes de difusividad efectiva obtenidos se encontraron dentro del rango 9.50E-11 a 9.50 E-10 m^2/s y se encuentran ampliamente influenciados por la temperatura de secado aumentado con el incremento de esta.

Bibliografía

[1] G. Barrientos Rivera, E.L. Esparza Ibarra, H.R. Segura Pacheco, O. Talavera Mendoza, M.L. Sampedro Rosas and E. Hernández Castro, *Caracterización morfológica de Agave angustifolia y su conservación en Guerrero, México*, Rev. Mex. Ciencias Agrícolas 10 (2019), pp. 655–668.

[2] *Antioxidant and antimicrobial activity of Agave angustifolia extract on overall quality and shelf life of pork patties stored under refrigeration*. 2018.

[3] *Producción Agrícola*. Available at https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119.

[4] *"Producción total"*.. Available at https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/.

[5] G.A. Martínez Gutiérrez, G. Íñiguez Covarrubias, Y.D. Ortiz-Hernández, J.Y. López-Cruz and M.A. Bautista Cruz, *Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate*, Rev. Int. Contam. Ambient. 29 (2013), pp. 209–216.

[6] *Biological activities of Agave by-products and their possible applications in food and pharmaceuticals*. 2018.

[7] The Official Methods of Analysis of AOAC International, *Aoac 2016*, Off. Methods Anal. AOAC Int. (2016), .

[8] J. Candelario, G. Luna, G. Urrea and A. Ramírez, *Determinación de parámetros característicos del proceso de secado en mango y zanahoria aplicando modelos cinéticos*, Rev. Simulación y Lab. Vol.4 (2017), pp. 28-32 pp.

[9] O.A. Azaka, S.O. Enibe and C.H. Achebe, *Determination of moisture diffusivity during drying of rectangular cassava pellets : Experimental and modeling study*, J. Eng. Appl. Sci. Vol.15 (2019), pp. 56-63 pp.

[10] A.D. Giraldo-Zuniga, A. Arévalo-Pinedo, A.F. Silva, P.F. Silva, J.C. Valdes-Serra and M.C. de M. Pavlak, *Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum) en rodajas*, Ciência e Tecnol. Aliment. 30 (2010), pp. 179–182.

[11] J.S. Roberts, D.R. Kidd and O. Padilla-Zakour, *Drying kinetics of grape seeds*, J. Food Eng. 89 (2008), pp. 460–465.

[12] J. Jiménez-Guzmán, *Secado y descascarillado simultáneo de café pergamino en un secado de lecho por fuente con tubo central*, Inst. Politécnico Nac. (2011), pp. 99.

[13] S. Prachayawarakorn, W. Tia, N. Plyto and S. Soponronnarit, *Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature*, J. Food Eng. 85 (2008), pp. 509–517.

[14] V.R. Sagar and P. Suresh Kumar, *Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review*, J. Food Sci. Technol. 47 (2010), pp. 15–26.

[15] L. Mayor, R. Moreira and A.M. Sereno, *Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (Cucurbita pepo L.) fruits*, J. Food Eng. 103 (2011), pp. 29–37.

[16] M.I.H. Khan, C. Kumar, M.U.H. Joardder and M.A. Karim, *Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials*, Dry. Technol. 35 (2017), pp. 335–346.

[17] R.G.M. Van Der Sman and M.B.J. Meinders, *Moisture diffusivity in food materials*, Food Chem. 138 (2013), pp. 1265–1274.

[18] A. Vega Gálvez, C. Tello Ireland and R. Lemus Mondaca, *Simulación Matemática Del Proceso De Secado De La Gracilaria Chilena (Gracilaria Chilensis)*, Ingeniare. Rev. Chil. Ing. 15 (2007), .