

Cinética de secado de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) variedad CORPOICA M-tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire

Drying kinetics of cassava (*Manihot esculenta Crantz*) variety CORPOICA M-tai depending on the temperature and air velocity

Cinética da secagem da mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) variedade CORPOICA M-tai dependendo da temperatura e velocidade do ar

Jairo Salcedo Mendoza*; José L. Mercado B; Miguel Vanegas B; Alfredo Fernández Q; Melba L. Vertel M.

Grupo de Investigación PADES. Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad de Sucre, Cra. 28 # 5-267. Sincelejo, Colombia.

*Jairo.salcedo@unisucre.edu.co

Fecha Recepción: 26 de enero de 2014

Fecha Aceptación: 4 de agosto de 2014

Resumen

El secado de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) variedad CORPOICA M-tai, fue realizado en un secador de bandejas a escala de laboratorio. Muestras de yuca con espesor de 0,2cm y diámetro de 0,4cm fueron colocadas en el equipo en contacto directo con aire caliente, bajo distintas condiciones de operación. Se evaluó el efecto de la temperatura (35, 45 y 55°C) y la velocidad del aire (1,0, 2,0 y 3,0m/s) sobre el tiempo de secado y la difusividad efectiva. Los resultados obtenidos indicaron que a una temperatura y flujo de aire de 55°C y 3,0 m/s respectivamente, el tiempo de secado fue de 4,5h, alcanzándose una humedad de 4,87%. Los datos derivados de las curvas de secado fueron ajustados a los modelos de Newton, el de Dos términos exponencial, el de Wang y Singh, el de Henderson y Pabis modificado y el Difusión aproximada. De acuerdo con los resultados el modelo matemático que describió mejor el comportamiento cinético de las curvas de secado fue el modelo Difusión aproximada con una regresión lineal ($0,958 \leq R^2 \leq 0,993$). La difusividad efectiva (Df) de la yuca varió entre $1,26 \times 10^{-10}$ y $4,14 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ y la energía de activación (Ea) varió entre 33,66 a 16,16KJ /mol.

Palabras clave: yuca, curvas de secado, tiempo de secado, modelos cinéticos, difusividad efectiva.

Abstract

Drying cassava (*Manihot esculenta Crantz*) variety CORPOICA M-tai was performed in a dryer trays at laboratory scale. Samples of cassava with thickness of 0.2cm and 0.4cm diameter were placed on the dryer in direct contact with hot air under several operation conditions. The effect of temperature (35, 45 and 55°C) and air velocity (1.0, 2.0 and 3.0m/s) were studied on the drying time and effective diffusivity were assessed. The results showed that to the a temperature of 55°C and an air flow of 3.0m/s the drying time was of the 4.5h, reaching moisture 4.87% . Data obtained from the drying curves were adjusted to model Newton, Two exponential term, Wang and Singh, Modified Henderson and Pabis, and the Diffusion approximation. According to the results the mathematical model that best described the behavior of kinetic curves of drying was the diffusion Approximation model with a linear regression (0.958

$\leq R^2 \leq 0.993$). The effective diffusivity (D_f) value varied between 1.26×10^{-10} y $4.14 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ and the activation energy (E_a) varied between 33.66KJ/mol to 16.16KJ/mol.

Keywords: cassava, curves of drying, drying time, kinetic models, effective diffusivity.

Resumo

O secado da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) variedade CORPOICA M-tai, foi realizado no secador de bandejas a escala laboratorial. Amostras de mandioca com espessura de 0,2cm e diâmetro de 0,4cm foram colocadas no equipamento de secagem e em contato directo com ar quente, sob diferentes condições de operação. Assim, se avaliou o efeito da temperatura (35, 45 e 55°C) e da velocidade do ar (1,0, 2,0 e 3,0m/s), sobre o tempo de secagem e a difusividade efectiva. Os resultados obtidos indicaram que na temperatura e velocidade do ar de 55°C e 3,0m/s, respectivamente, o tempo de secagem foi de 4,5h, atingindo-se uma umidade de 4,87%. Os dados derivados das curvas de secagem foram ajustados aos modelos de Newton, de dois termos exponencial, de Wang e Singh, de Henderson e Pabis modificado e ao modelo de Difusão aproximada. Os resultados indicaram que o modelo matemático que descreveu melhor o comportamento cinético das curvas de secado foi o modelo de difusão aproximada, com uma regressão linear ($0,958 \leq R^2 \leq 0,993$). A difusividade efectiva (D_f) da mandioca variou entre $1,26 \times 10^{-10}$ y $4,14 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ e a energia de activação (E_a) variou entre 33,66 a 16,16KJ/mol.

Palabras-chave: mandioca, curvas de secagem, tempo de secagem, modelos cinéticos, difusividade efectiva.

Introducción

El secado es una operación unitaria de separación, mediante la cual se remueve agua o algún otro compuesto volátil por evaporación, de la que se obtiene un producto sólido. Esta operación unitaria se lleva a cabo por razones relacionadas con la preservación o prolongación de la vida útil de algunos productos biológicos, entre ellos los alimentos [1-3]. Productos como la yuca (*Manihot esculenta* Crantz), por tener una humedad entre 60 y 65%, puede provocar que existan grandes pérdidas de poscosecha, debido a la deficiencia de mecanismos tecnológicos que se emplean en su conservación [4].

Aspectos como la geometría y espesor del producto a secar, al igual que las propiedades del aire utilizado en el proceso (humedad relativa, temperatura y velocidad del aire), inciden directamente en la pérdida de humedad del material a deshidratar, y por lo tanto, en la cinética de secado de los mismos [5]. Por tal motivo, modelar las curvas de secado de productos de origen biológico se convierte en una alternativa para conocer y comprender los fenómenos que rigen su comportamiento [6]. Tradicionalmente, la representación matemática del secado de alimentos se ha realizado por lotes, con acción convectiva empleando flujos de aire

forzado [7-10]. Desde entonces, varios modelos matemáticos sobre la cinética de secado se han aplicado en diversos productos agrícolas [11,12]. Existen en la actualidad gran variedad de modelos matemáticos empíricos, semiempíricos y teóricos, para el secado de alimentos, entre los que se encuentran los modelos de: Newton, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Henderson y Pabis modificado, Logarítmico, De dos términos, De dos términos exponencial, el de Wang y Singh Thompson, el Difusión aproximada y otros. Estos modelos están basados en la segunda ley de difusión de Fick [1].

Actualmente el secado de yuca en la costa atlántica colombiana se hace a través de procesos de secado natural en piso, que produce largos tiempos de secado y dependencia de las condiciones climáticas. El objetivo de la presente investigación fue determinar la cinética y parámetros cinéticos del secado de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad CORPOICA M-tai, para que puedan ser usados en el diseño de secadores industriales de yuca. En esta investigación se utilizó un secador de bandejas, se obtuvieron curvas de secado y se ajustaron los valores a modelos cinéticos, a partir de los cuales se determinó la difusividad efectiva y la energía de activación de la yuca para las condiciones operativas establecidas.

Parte Experimental

Obtención y adecuación de la muestra. Para la realización de la investigación, se utilizó yuca (*Manihot esculenta Crantz*) en estado fresco, la materia prima empleada fue la variedad CORPOICA M-tai, que fueron suministradas por la Planta Productora de almidón de yuca "ALMIDONES DE SUCRE S.A.S.". Inicialmente las muestras fueron sometidas a tratamientos previos de preparación como: selección y clasificación, lavado, pelado, corte y pesaje. Se estableció el peso seco de las muestras mediante el método de la estufa a 105°C durante 24h [13], con el cual se determinó la humedad inicial del producto.

Equipos y procedimientos. Se utilizó un secador de bandejas (Figura 1) a escala de laboratorio, construido en acero inoxidable AISI 304, montado sobre ruedas. Consta de una cámara de secado de 450 x 450 x 450mm, la cual contiene cuatro bandejas de acero inoxidable de 400 x 300 x 68mm para una capacidad de carga máxima de 3500g. Posee un sistema de control PID de velocidad del

aire, con un caudal máximo de 3,1m³/h, con motor trifásico (potencia de 0,3Kw, velocidad máxima de 1400rpm y caudal máximo de 3,1m³/h) un filtro de aire en acero inoxidable (con velocidad máxima del aire en el túnel de 6,6m/s), un convertidor de frecuencia para controlar la velocidad del ventilador, nueve resistencias eléctricas de 300W, un tiristor para el control de potencia de las resistencias, una balanza electrónica con pantalla digital (con divisiones de 0,1g), dos transmisores combinados de temperatura/humedad (escalas de -40 a 60°C y de 0 a 100% de Humedad relativa con divisiones de 0,1°C y 0,1% respectivamente), un anemómetro digital (escalas de 0 a 10m/s) y un tablero eléctrico IP 55 (con cuadro sinóptico, tres pantallas de visualización de temperatura electrónicas, dos de humedad relativa, ventilador, conmutadores de resistencia y potenciómetros). También se empleó una balanza electrónica (KERN MLB 50-3), con una exactitud $\pm 0,01g$ y con divisiones de 0,1g y carga de 0 a 400g, una tajadora de aluminio y un molde cilíndrico hueco de aluminio para obtener muestras con un espesor de 0,2cm y diámetro de 4cm.



Figura 1. Secador de bandejas a escala de laboratorio.

Construcción de las curvas de secado. Para la obtención de los datos para la construcción de las curvas de secado, se realizaron corridas experimentales a las temperaturas de bulbo seco de 35, 45 y 55°C, y velocidades del aire de secado de 1,0, 2,0 y 3,0m/s. Con el fin de obtener resultados estadísticamente representativos, se efectuaron

para cada condición operativa tres repeticiones. Inicialmente se procedió a colocar las muestras en el secador, llenando por completo las cuatro bandejas, se determinó la pérdida de peso de las muestras por intervalos de 5min para la primera hora, de 10min para la segunda hora y de 15min en adelante, hasta alcanzar peso constante. Este

procedimiento fue realizado a cada una de las condiciones de proceso establecidas. La humedad de equilibrio de la yuca (X_e) se determinó a partir de la Ecuación 1 propuesta por Rossi y Roa [15].

$$X_e = (p_1 HR + p_2 HR^2 + p_3 HR^3) \text{Exp}[(Q_0 + Q_1 HR + (Q_2 HR^2 + Q_3 HR^3 + Q_4 HR^4)(T + Q_5)] \quad (1)$$

$$p_1 = 0,4490 \quad p_2 = -0,2453 \quad p_3 = 0,07280$$

$$Q_0 = -0,00420 \quad Q_1 = -0,01760 \quad Q_2 = 0,03550$$

$$Q_3 = -0,06890 \quad Q_4 = 0,06250 \quad Q_5 = 9,9$$

Donde:

X_e = Humedad de equilibrio de la yuca en base seca (Kg agua / Kg Sólido seco)

HR = Humedad relativa del aire decimal

La velocidad de secado se calculó por el método propuesto por Geankoplis [15], graficando el contenido de humedad libre en base seca (X) en función del tiempo (t) y de la velocidad de secado (R) en función de humedad en base seca (X).

Determinación matemática del modelo cinético de secado. Los datos derivados de cada condición de trabajo, fueron reemplazados en la Ecuación 2 y

se determinó la razón de humedad de la yuca (MR) en función del tiempo de secado.

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \text{Exp}\left(\frac{-D_f \pi^2 t}{4l^2}\right) \quad (2)$$

Donde: l = espesor de la muestra (m)

Con los valores de MR y t , se evaluaron cinco modelos matemáticos para el secado de alimentos y se estableció cuál de estos presentó mayor ajuste estadístico en el secado de la yuca. Los modelos propuestos fueron: modelo de Newton, exponencial de dos términos, Wang y Sing, Difusión aproximada, y el de Henderson y Pabis Modificado (Tabla 1). Para la selección del modelo cinético se empleó como parámetro el coeficiente de determinación (R^2), el error porcentual absoluto medio (MAE), y cuadrado medio del error ($RMSE$) (Ecuaciones 3 y 4).

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|MR_{\text{mod}} - MR_{\text{exp}}|}{N} \quad (3)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{mod}} - MR_{\text{exp}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Tabla 1. Modelos matemáticos propuestos.

Modelo Matemático	Ecuación
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Dos términos exponencial	$MR = \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Henderson y Pabis Modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$

Fuente: Ertekinyaldiz [1]

Determinación de la difusividad efectiva y la energía de activación. A partir de los valores derivados del modelo matemático que presentó el mejor ajuste estadístico, se determinó el coeficiente de difusividad efectiva (D_f) a partir de la aplicación de la segunda ley de Fick (Ecuación 5). La difusividad efectiva se obtuvo al graficar el logaritmo de MR en función del tiempo (t), de la cual resultó una línea recta de cuya pendiente se

calculó la D_f para cada temperatura y velocidad del aire de secado utilizada.

A partir de las D_f calculadas, se empleó la ecuación de Arrhenius (Ecuación 5), para determinar la energía de activación E_a (en KJ/mol) de la yuca para cada condición operativa empleada.

$$D_f = D_0 \text{Exp}\left(-\frac{E_a}{R_G T_k}\right) \quad (5)$$

Donde:

R_G = Constante general de los gases ($8,314 \times 10^{-3}$ KJ/mol*K)

D_o = Factor de Arrhenius en m^2/s

E_a = Energía de activación en KJ/mol

T_k = Temperatura Kelvin

Para la construcción de las curvas de secado se empleó un diseño factorial 3x3 aleatorio. Se emplearon dos factores, la temperatura en tres niveles y la velocidad del aire en tres niveles, para un total de nueve tratamientos de tipo cuantitativo. Se realizaron tres repeticiones por tratamiento para un total de 27 unidades experimentales. Mediante el test de Shapiro-Wilk, se determinó cuales datos fueron normales. Para los datos que no presentaron una distribución normal se les realizó una transformación lineal mediante la función logaritmo, y el test para verificar su normalidad. Posteriormente se les realizó un ANAVA al 95% de confiabilidad, usando un modelo de dos vías de clasificación (temperatura y velocidad del aire) con interacciones. Debido a que los factores son cuantitativos (temperatura y velocidad del aire) se aplicó la prueba de comparación de medias

(polinomios ortogonales). También se empleó la metodología de superficie de respuesta para la optimización de las variables dependientes. Todos los datos fueron procesados y evaluados por el programa *R Development Core Team* [15].

Resultados y Discusión

Curvas de secado. En la información recopilada por triplicado para la obtención de los resultados para la construcción de las curvas de la humedad en base seca (X) con respecto al tiempo, el análisis de ANAVA presentó un valor-P mayor o igual a 0,05, el cual expresa que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95 % de confianza. Los resultados obtenidos indican la influencia de la temperatura a diferentes velocidades de aire de secado, en la reducción del contenido de humedad de la yuca. En las Figuras 2, 3 y 4 se observa, que al aumentar la temperatura se presenta un incremento de la velocidad de pérdida de la humedad libre (X). Este resultado representa el comportamiento del secado de vegetales y cereales [1,3,4,17,19,20].

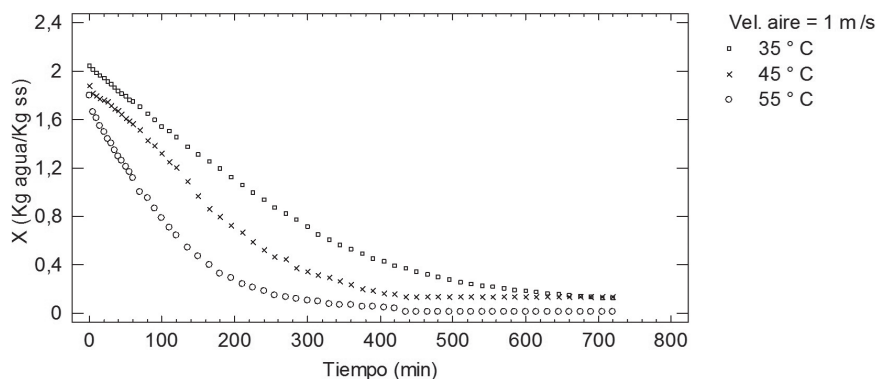


Figura 2. Humedad libre (X) en función del tiempo t (h), para 1,0m/s.

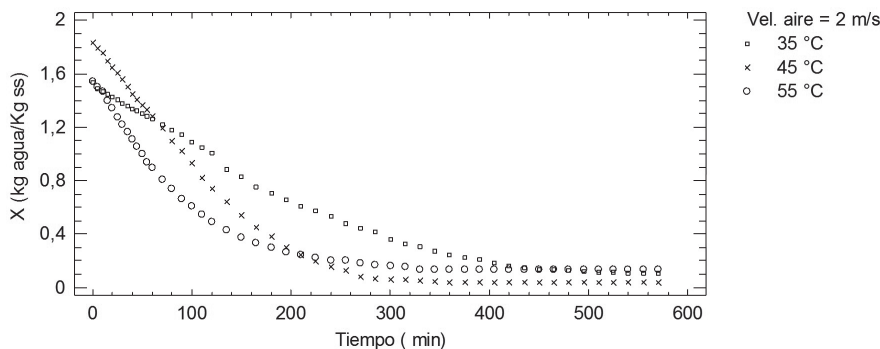


Figura 3. Humedad en base seca (X) en función del tiempo t (h), para velocidad de aire de 2,0m/s.

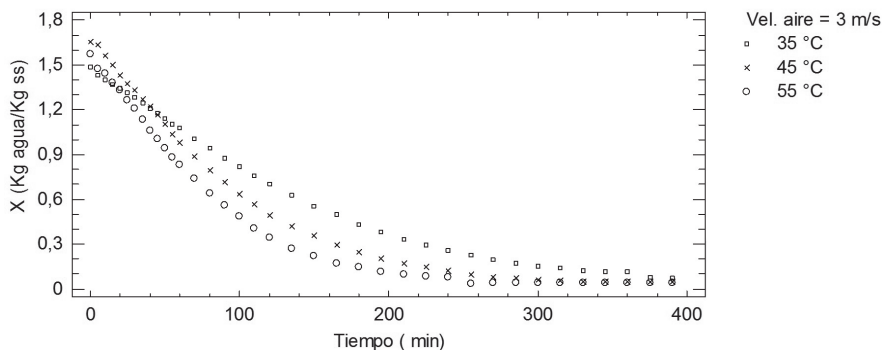


Figura 4. Humedad en base seca (X) en función del tiempo t (h), para velocidad de aire de 3,0 m/s.

Para una temperatura de 35°C se observó una disminución del tiempo de secado cuando se aumenta la velocidad del aire, fenómeno que se explica por la dificultad que encuentra el agua para migrar desde el interior a la superficie de sólido.

Para una temperatura constante de 35°C y 3,0m/s el tiempo de secado de la yuca variedad M-tai es de aproximadamente 7,0h, un 28,6% menor que trabajando con la misma temperatura a 2,0m/s y 71,4% menor en comparación con 1,0m/s (Tabla2).

Tabla 2. Influencia de la temperatura y la velocidad del aire sobre el tiempo de secado.

		Temperatura de secado en °C		
		35	45	55
Velocidad del aire de secado en m/s	1,0	12h ± 0,0	7,5h ± 0,0	7,0h ± 0,29
	2,0	9,0h ± 0,167	6,25h ± 0,125	5,75h ± 0,167
	3,0	7,0h ± 0,5	5,5h ± 0,04	4,5h ± 0,167

Según la prueba estadística realizada a los datos derivados del tiempo de secado, se determinó que estos no presentan una distribución normal, por lo tanto son transformados para linealizar su comportamiento. Luego, de la ANAVA realizada a un nivel de significancia del 5%, se encontró que la temperatura, la velocidad del aire, y la interacción entre estos dos factores generan diferencias significativas en los tiempos de secado. Mediante la prueba de contrastes ortogonales realizada a los tratamientos, se determinó que solamente las respuestas temperatura lineal y velocidad (lineal y cuadrática) muestran diferencias significativas en las medias de los tiempos de secado. Con respecto a las interacciones entre la temperatura y la velocidad de aire se observa que para cada contraste, existen diferencias significativas tanto, para la respuesta lineal, como para la respuesta cuadrática, al igual que para las combinaciones entre estas (Tabla 3).

A partir de los contrastes ortogonales se determina

la regresión polinómica (con un coeficiente de correlación, $R^2=98.09\%$) que representa el comportamiento del tiempo de secado t_s (Ecuación 6).

$$t_s = 86,21875 - 3,1111(T) + 0,03125(T^2) - 25,765625(V) + 0,3333(V^2) + 0,979167(T*V) - 0,010208(T^2*V) \quad (6)$$

En la Figura 5, se observan los tiempos de secado (t_s) para las distintas condiciones de trabajo utilizadas, en la cual se percibe que para un rango de temperaturas relativamente altas de 40 a 55°C con respecto a la temperatura promedio de gelatinización del almidón de yuca, y velocidades de aire de 2,0 a 3,0m/s se lograron los menores tiempos de secado de 7,5 a 4,5 horas. Se deben evitar temperaturas de secado cercanas a la gelatinización del almidón de yuca (60–63°C), ya que en presencia de la alta humedad de la yuca genera problemas de obstrucción en los equipos de secado.

Tabla 3. ANAVA para los tiempos de secado y prueba de contrastes ortogonales.

F. V	gl	SC	CM	F	Pr(>F)
Tratamiento	8	126,792	15,849	175,557	1,768 e-15 ***
Temperatura	2	63,931	3,965	354,077	3,533e-15 ***
T _L	1	0,753	0,753	8,3356	0,00981 **
T _Q	1	0,045	0,045	0,4986	0,48914
Velocidad	2	54,056	27,028	299,385	1,536e-14 ***
V _L	1	12,383	12,383	137,165	7,457 e-10 ***
V _Q	1	1,469	1,469	16,277	0,0007778 ***
T x V	4	8,806	2,201	2,385	4,648e-07 ***
T _L x V _L	1	5,251	5,251	58,1654	4,808 e-7 ***
T _L x V _Q	1	0,627	0,627	6,9423	0,01682 *
T _Q x V _L	1	14,222	14,222	157,54	2,440 e-10 ***
T _Q x V _Q	1	92,042	92,042	1019,54	<2,2 e-16 ***
Residuos	18	1,625	0,09		

Signif. Codes: 0 (***), 0.001 (**), 0.01 (*), 0.05 (.), 0.1 ()

T_L= temperatura lineal °C ; T_Q= temperatura cuadrática; V_L= velocidad lineal m/s;

V_Q= velocidad cuadrática; T= temperatura °C. Gl= grados de libertad;

SC= suma de cuadrados; CM= cuadrado medio

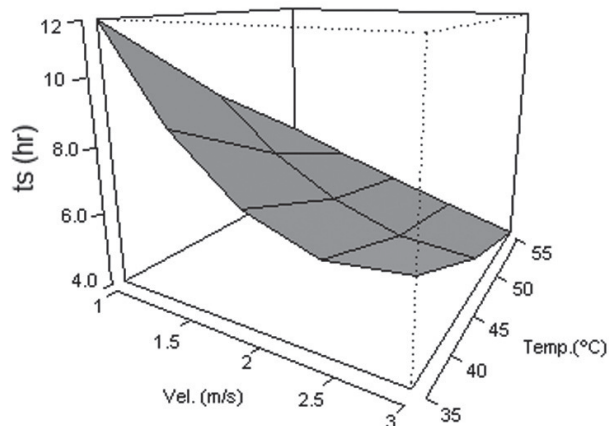


Figura 5. Superficie de respuesta estimada para el tiempo de secado en función de la temperatura y la velocidad del aire.

Curvas de velocidad de secado. Durante el secado de la yuca, se evidenciaron las cuatro fases que rigen normalmente el secado de alimentos (Figuras 6, 7 y 8). Inicialmente se observa una fase de inducción o de estabilización para un intervalo de 5 a 10min, en la cual la temperatura de las muestras se incrementa con el tiempo, pero esta a su vez, no alcanza el 5% de reducción de la humedad (X) (KgH₂O/Kg sólido seco), pero si una elevación de la velocidad de secado (R) máxima lograda, hasta que el sólido alcanza el equilibrio

con el sistema. Seguida a esta fase, empieza el periodo de velocidad constante que tarda entre 15 a 20min aproximadamente, en la cual hay una reducción de la humedad entre 8 a 15% en base seca y que depende de las condiciones operativas utilizadas. Luego, se percibe el periodo predominante en el secado de la yuca (periodo decreciente) comprendido por dos fases (primera y segunda), las cuales aportan el mayor porcentaje de reducción de la humedad libre en función de la cinética de secado del producto. Comportamiento análogo obtuvo Carranza J *et al.* [18] en el secado de plátano y yuca.

En el periodo de velocidad constante, se evidencia que entre mayor es la temperatura y la velocidad del aire, mayor es la velocidad de secado, específicamente para 55°C y 3,0m/s, R tiene un valor de 0,741KgH₂O/h.m² y la menor velocidad de secado corresponde a 35°C y 1m/s presentando un valor de 0,234KgH₂O/h.m². A pesar de existir una diferencia entre las velocidades de secado del 68% exhiben una reducción de X , del 9% aproximadamente. Este fenómeno muestra el efecto de la temperatura y velocidad del aire sobre el periodo de velocidad constante, donde se concluye que a mayor temperatura y velocidad de aire produce una mayor remoción de agua no combinada, disminuyéndose los tiempos de este periodo de secado.

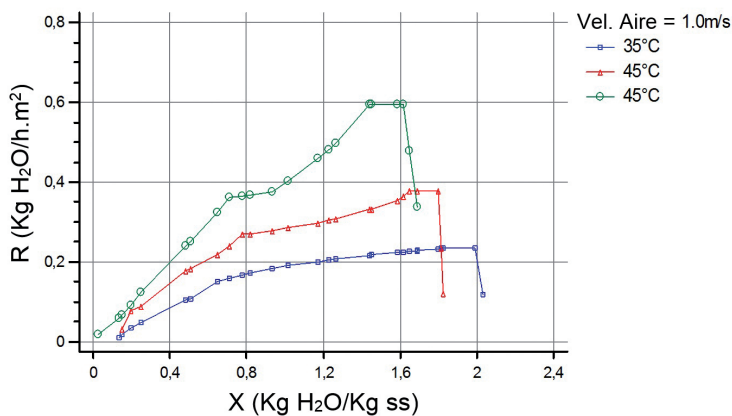


Figura 6. Velocidad de secado (R) en función de la humedad en base seca (X), para velocidad de aire de 1,0m/s.

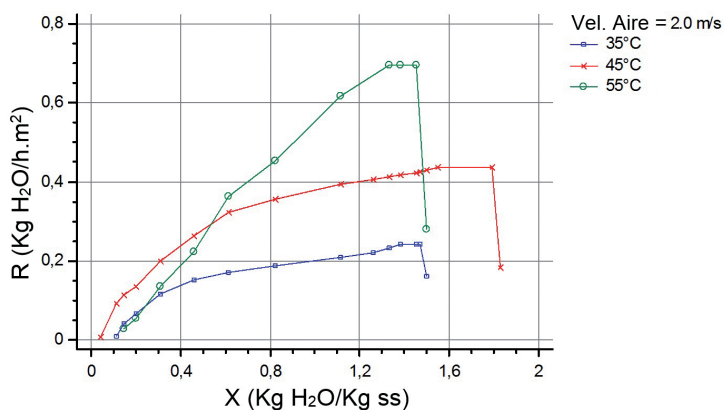


Figura 7. Velocidad de secado (R) en función de la humedad en base seca (X), para velocidad de aire de 2,0m/s

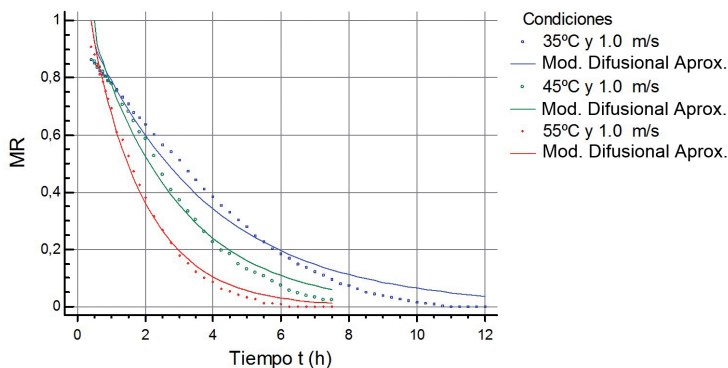


Figura 8. Velocidad de secado (R) en función de la humedad en base seca (X), para velocidad de aire de 3,0 m/s.

Después del periodo de velocidad constante de la yuca comienza el periodo de velocidad decreciente comprendido por dos fases. Una primera fase en el cual el descenso de la humedad (X) es parcialmente proporcional a la disminución de la velocidad de secado (R). En las Figuras 2 y

6, se observa que para una velocidad constante de 1,0m/s, presenta una reducción de la humedad del producto a medida que aumenta la temperatura, evidenciándose que para esta primera fase, entre menor es la temperatura de trabajo, mayor es el tiempo de secado. En términos generales

la velocidad de eliminación del agua es mayor cuando aumenta la temperatura, retirándose un alto porcentaje de agua en este primer periodo. Posteriormente, empieza el segundo periodo de velocidad decreciente en la cual la pérdida de humedad es mucho más lenta que la del periodo anterior, lo que indica que el agua tiene gran dificultad para migrar hacia la superficie por la

alta retracción que presenta el sólido provocada por la gran desecación en que se encuentran las muestras, lo cual repercute directamente en la reducción de la cinética de secado (R). La Tabla 4, presenta los tiempos para los diferentes periodos de secado, donde se puede identificar el periodo que consume mayor tiempo durante el secado y con baja velocidad de remoción de agua.

Tabla 4. Tiempo de secado (min) para cada periodo o fase del proceso.

		Temperatura de secado en °C											
		35				45				55			
		PAB	PBC	PCD	PDE	PAB	PBC	PCD	PDE	PAB	PBC	PCD	PDE
Velocidad del aire de secado en m/s	1,0	5	20	295	400	10	20	155	265	10	15	85	340
	2,0	5	20	265	250	10	20	105	240	10	15	75	250
	3,0	5	15	180	220	10	15	85	220	10	15	75	170

PAB(Periodo de adaptación), PBC(Periodo de velocidad constante), PCD y PDE(primer y segundo periodo de velocidad decreciente respectivamente).

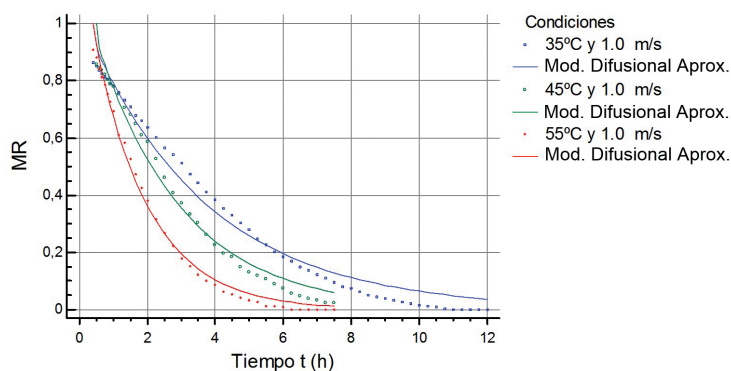


Figura 9. Razon de humedad (MR) en funcion del tiempo de secado t (h), para velocidad de aire de 1,0m/s.

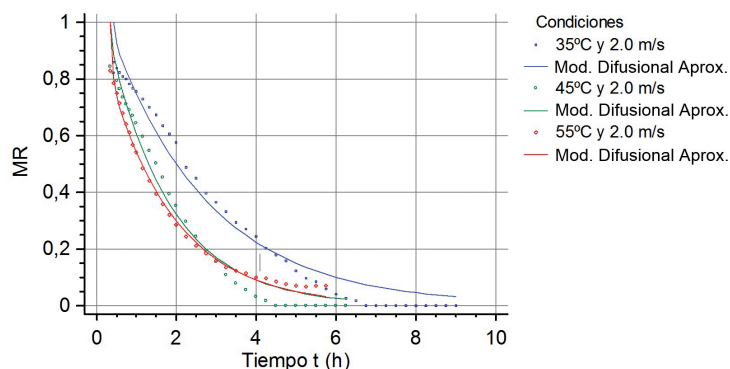


Figura 10. Razon de humedad (MR) en funcion del tiempo de secado t (h), para velocidad de aire de 2,0m/s.

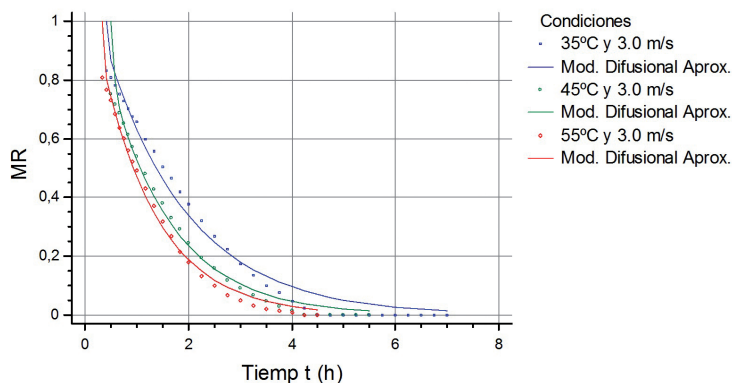


Figura 11. Razon de humedad (MR) en funcion del tiempo de secado (t), para velociadd de aire de 3,0 m/s.

Modelo de la cinética de secado. Para la validación del modelo cinético de secado de la yuca, se utilizó el modelo de humedad de equilibrio (Ecuación 1) y los datos obtenidos de la razón de humedad (MR) de la yuca con respecto al tiempo de secado para los diferentes ensayos.

Las Figuras 9, 10 y 11 muestran el ajuste del modelo cinético que mejor representó a los datos experimentales del proceso de secado de la yuca, siendo el modelo matemático Difusión

aproximal que presenta la mejor regresión ($0,958 \leq R^2 \leq 0,993$) al igual que el menor error potencial absoluto (MAE) y menor cuadrado medio del error (RMSE) (Tabla 5). Sin embargo, el resto de los modelos cinéticos mostraron un buen ajuste matemático ya que presentaron un $R^2 \geq 80\%$. Resultados similares de aplicación del modelo aproximal fueron presentados para el secado de pimienta roja [21].

Tabla 5. Parámetros estadísticos de modelos cinéticos en el ajuste de las curvas de secado de la yuca.

Condiciones		Constantes (1)	R^2 (%) (1)	MAE (1)	RMSE (1)	R^2 (%) (2)	R^2 (%) (3)	R^2 (%) (4)	R^2 (%) (5)
T(°C)	V(m/s)								
		a= 0,06793							
	1	k= 0,339174	98,026	0,037	0,00193	97,4196	97,799	96,5798	85,0122
		b= 0,0137355							
		a= 0,0508995							
35	2	k= 0,388431	97,3975	0,043	0,00278	97,0828	97,306	96,9926	87,1077
		b= 0,0172764							
		a= 0,0898452							
	3	k= 0,722336	97,6184	0,037	0,00238	96,7316	97,3247	93,2948	89,8349
		b= 0,0144044							
		a= 0,0548393							
	1	k= 0,519471	97,9821	0,035	0,00198	97,5238	97,8286	96,9808	84,7314
		b= 0,0125977							

T(°C)	V(m/s)	Constantes (1)	R ² (%) (1)	MAE (1)	RMSE (1)	R ² (%) (2)	R ² (%) (3)	R ² (%) (4)	R ² (%) (5)
		a= 0,0673551							
45	2	k= 0,660627 b= 0,0160667 a= 0,211564	97,493	0,04	0,00263	93,153	96,5047	82,6971	99,8829
	3	k= 0,268753 b= 0,0498471 a= 0,0277597	95,7962	0,029	0,00323	91,1012	93,9387	76,6136	99,3594
	1	k= 0,357979 b= 0,0290875 a= 0,18778	99,2948	0,022	0,00077	99,2273	99,1323	95,7152	90,777
55	2	k= 0,367152 b= 0,0271628 a= 0,134445	98,1525	0,018	0,00132	93,7186	96,7616	81,6761	99,7099
	3	k= 1,12338 b= 0,0135465	97,5062	0,025	0,002130	95,3923	96,8195	87,2049	99,3416

(1): Difusional aproximado; (2): Dos términos exponencial; (3):Newton; (4): Wang y Sing; (5): Henderson y Pabis Modificado.

Evaluación de la difusividad efectiva y la Energía de Activación. La Tabla 6 muestra que la difusividad efectiva (D_p) de la yuca, aumenta a medida que se incrementa la temperatura y el flujo de aire de secado, trayendo consigo una disminución considerable en la resistencia interna del sólido a la migración de la humedad libre. La disminución de la resistencia que aporta el material se puede explicar como el efecto que la elevación de la temperatura ejerce sobre la estructura de la matriz sólida, afectando la porosidad de la yuca, que produce una mayor migración del agua por área superficial. Según Madamba PS *et al.* [22], el rango de difusividades para materiales alimenticios es de 1×10^{-11} a $1 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$. Este estudio mostró, que la D_p de la yuca variedad M-tai, se encuentra en dicho intervalo ($1,261 \times 10^{-10}$ a $4,137 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$). Otros autores también corroboran este rango para los siguientes productos: Zogzas NP *et al.* [23] trabajando con cereales, obtuvo las siguientes difusividades: $0,11 \times 10^{-10}$ a $5,3 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ para el maíz; $5,1 \times 10^{-10}$

a $2,2 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ para el trigo; y $1,3 \times 10^{-10}$ a $3,2 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ para el arroz); Akpinar EK [19] encontró que para la fresa la D_p tiene un valor entre $4,528 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ y $9,631 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$. Según la ANAVA realizada a los valores de la difusividad efectiva de la yuca, se determinó que la temperatura y la velocidad del aire influyen significativamente sobre esta. Sin embargo, la interacción temperatura-velocidad no muestra tal diferencia. Mediante la prueba de contrastes ortogonales realizada a los tratamientos se establece que solamente la temperatura lineal y la velocidad lineal muestran diferencias significativas con respecto a la difusividad efectiva, mientras que las respuestas cuadráticas no reflejan tal comportamiento. Con respecto a los contrastes entre la temperatura y la velocidad de aire se observa que únicamente las interacciones $V_a * T_a$ y $T_a * V_L$ muestran diferencias significativas entre las medias de los tratamiento (Tabla 7).

Tabla 6. Difusividad efectiva D_f (m²/s) en función de la temperatura y de la velocidad de aire de secado.

		Temperatura de secado (°C)		
		35	45	55
	1	1,261 x 10 ⁻¹⁰	1,773 x 10 ⁻¹⁰	2,816 x 10 ⁻¹⁰
Vel. del aire (m/s)	2	1,817 x 10 ⁻¹⁰	2,723 x 10 ⁻¹⁰	3,345 x 10 ⁻¹⁰
	3	2,819 x 10 ⁻¹⁰	3,665 x 10 ⁻¹⁰	4,137 x 10 ⁻¹⁰

Tabla 7. ANAVA para la difusividad efectiva (D_f) y prueba de contrastes ortogonales.

F.V	gl	SC	CM	F	Pr>(F)
Tratamientos	8	24,8553	3,1069	11,1483	1,431e-05 ***
Temperatura	2	11,8892	5,9446	21,3305	1,783e-05 ***
T _L	1	2,8770	2,8770	10,3232	0,004823 **
T _Q	1	0,0008	0,0008	0,0028	0,958221
Velocidad	2	12,4886	6,2443	22,4058	1,303e-05 ***
V _L	1	5,4230	5,4230	19,4588	0,000337 ***
V _Q	1	0,1725	0,1725	0,6191	0,441620
T*V	4	0,4776	0,1194	0,4284	0,7862
T _L *V _L	1	0,3620	0,3620	1,2988	0,2694
T _Q *V _L	1	1,8155	1,8155	6,5143	0,02000 *
V _Q *T _L	1	0,4633	0,4633	1,6623	0,2136
V _Q *T _Q	1	13,7413	13,7413	49,3069	1,490e-06 ***
Residuos	18	5,0164	0,2787		

Signif: 0 (***), 0.001 (**), 0.01 (*), 0.05 (.), 0.1 ()

T_L= temperatura lineal °C; T_Q= temperatura cuadrática; V_L= velocidad lineal m/s; V_Q= velocidad cuadrática; T= temperatura °C

Gl= grados de libertad; SC= suma de cuadrados; cuadrado medio

A partir de los contrastes ortogonales se determinó la regresión polinómica ($R^2 = 79,17\%$), que representa el comportamiento de la difusividad efectiva (D_f), como se muestra en la Ecuación 8.

$$D_f = -2,65772 + 0,08305(T) + 0,80671(V) \quad (8)$$

Dónde:

V= velocidad del aire (m/s)

T= Temperatura (°C)

A partir de las (D_f) determinadas para cada condición operativa utilizada se establece la energía de activación (E_a) (en KJ/mol) y el coeficiente de Arrhenius (D_o) (m²/s), como se muestra en la Tabla 8. Los valores indicaron que para un rango de temperatura de 35 a 55°C, el aumento de la velocidad del aire provoca que D_o disminuya al igual que la energía de activación (E_a) mínima, para que la difusividad del agua se realice.

Tabla 8. Energía de activación (E_a) y coeficiente de Arrhenius (D_o), en función de la temperatura y la velocidad del aire de secado.

Rango de temperatura (35-55°C)			
		E_a (KJ/mol)	D_o (m/s)
Velocidad del aire de secado (m/s)	1	33,656	6,2887x10 ⁻⁵
	2	25,73	4,327x10 ⁻⁶
	3	16,16	1,586x10 ⁻⁷

Los valores de la energía de activación de la yuca se encuentran en el rango 12,7 a 110KJ/mol. Resultados similares de valores de energía de activación, fueron encontrados para diferentes alimentos como: zanahoria 28,39KJ/mol [24]; papa 20KJ/mol [25]; ñame de 17,5 a 21,49KJ/mol; pimienta gorda entre 55,78 a 59,89KJ/mol [26] y mango 46,459KJ/mol [17].

Conclusiones

El incremento de la temperatura y la velocidad del aire influyeron en el tiempo del secado alcanzando una disminución del 62,5% para condiciones de operación entre la temperatura de 55°C, 3,0m/s y 35°C, 1,0m/s. La velocidad de secado aumentó conforme se elevó la velocidad del aire de secado y la temperatura de proceso, alcanzando su tope máximo de 0,741KgH₂O/hm², trayendo consigo la reducción del tiempo de sacado y una menor humedad final en las muestras. El periodo predominante en el secado de la yuca fue el decreciente, ya que en este transcurre la mayor parte del tiempo de secado. La difusividad efectiva de la yuca aumentó con el ascenso de la temperatura y el flujo del aire de secado respectivamente, pero en general esta se mantuvo en un rango de 1,261x10⁻¹⁰ a 4,137x10⁻¹⁰m²/s y la energía de activación (*E_a*) disminuyó conforme aumentaron las condiciones operativas de trabajo, siendo mayor, cuando el flujo de aire fue de 1,0m/s (33,65KJ/mol) y menor cuando la velocidad del aire fue de 3,0m/s.

El modelo matemático que presentó mayor ajuste a las curvas de secado fue el modelo difusión aproximal con una regresión lineal entre (0,958 ≤ R² ≤ 0,993) y error porcentual absoluto medio *MAE* (0,0179831 ≤ *MAE* ≤ 0,0434616). Sin embargo, los modelos de Newton, el de Dos términos exponencial, el Wang y Singh, el de Henderson y Pabis modificado, presentaron un buen ajuste matemático a las curvas de secado.

Referencias bibliográficas

- [1] Ertekin C, Yaldiz O. Draying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *J. of foodengineering*. 2005;25:349-59.
- [2] Cardozo A, De Asis F. Comparación de los modelos matemáticos de calor isotérmicos de desorción en pulpa de Guayaba. *Revista Brasileira de almacenamiento*. 2004;29(1):28-34.
- [3] Vega A, Andres A, Fito P. Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicumannuum L. cv Lamuyo*). *Información tecnológica*. 2005;16:3-11.
- [4] Falade K, OlurinT, Ike E, Aworh O. Effic of pretreatment and temperature on air-Drying of *Discorea alata* and *Discorea rotundata* slices. *Journal of food engineering*. 2007;80(4):1002-20.
- [5] Krokida MK, Karathanos V, Maroulis Z, Marinou-Kouris D. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*. 2003;59(4):391-403.
- [6] Brennan JC, Butters JR, Cowrell RL, Lilly AE. *Las Operaciones de la Ingeniería de los alimentos*. España: Editorial Acribia; 1980.
- [7] Giner SA, Mascheroni R, Nellist ME. Cross-flow drying of wheat. A simulation program with a diffusion-based deep-bed model and a kinetic equation for viability loss estimations. *Drying Technology*. 1996;14(7-8):1625-71.
- [8] Herman E, Rodríguez GC, García MA. Mathematical modelling for fixed-bed drying considering heat and mass transfer and interfacial phenomena. *Drying Technology*. 2001;9(1):137-54.
- [9] Kiranoudis CT. Design of batch grape dryers. *Drying Technology*. 1988;16(1-2):141-62.
- [10] Ratti C, Mujumdar AS. Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal. *Journal of Food Engineering*. 1995;26(3):259-71.
- [11] Trelea IC, Courtois F, Trystram G. Dynamic models for drying and wet-milling quality degradation of corn using neural networks. *Drying Technology*. 1997;15(3-4):1095-102.
- [12] Montes EJ, Torres R, Andrade R, Pérez O, Marimon J. Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Revista Ingeniería e Investigación*. 2008;28(2):45-52.
- [13] Cunniff P. *Official methods of analysis of AOAC International*. 19th ed. Gaithersburg, Maryland, U.S.A: Association of Official Analytical Chemists;1997.
- [14] Rossi J, Roa G. *Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural*. Sao Paulo: ACIESP; 1980.
- [15] Ihaka R, Gentleman R. *A language and environment for statistical computing*. Viena: R Foundation for statistical computing; 2008.
- [16] Geankoplis CJ. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Tercera Edición. México. Compañía Editorial Continental S.A: tercera edición; 1988.
- [17] Ocampo, A. Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA*. 2006;5:193-28.
- [18] Carranza J, Sánchez M. Cinética de secado de *musa paradisiaca l.* "plátano" y *manihot esculenta Crantz* "yuca". *Revista Amazónica de Investigación Alimentaria*. Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la

- UNAP. 2002;2(1):15-25.
- [19] Akpınar EK, Bicer Y. Mathematical modelling and experimental study on thin layer drying of strawberry. *International Journal of Food Engineering*. 2006;2(1):1556-3758.
- [20] Mohammadi A, Rafiee S, Keyhame A, Emam-Djomeh Z. Estimation of Thin-layer Drying Characteristics of Kiwifruit (cv. Hayward) with Use of Page's Model. *J. Agric. & Environ. Sci*. 2008;3(5):802-5.
- [21] Akpınar E, Bicer Y, Yildis C. Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*. 2003;59(1):99–104.
- [22] Madamba PS, Robert H, Buckle K. The thinlayer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*. 1996;29(1):75-97.
- [23] Zogzas NP, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. Moisture diffusivity data compilation in foods tuffs. *Drying Technology*. 1996;14(10):2225-53.
- [24] Doymaz, I. Pretreatment effect on sun drying of mulberry Fruits (*Morus alba L*). *Journal of food engineering*. 2004;65(2):205-209.
- [25] Rosello C, Simal S, San Juan N. Nonostropic mass Transfer model for green Bean Drying. *Journal of Agricultural and food Chemistry*. 1997;6(1):69-76.
- [26] Perez C, Vizcarra Y. Modelamiento del Proceso de Secado de Pimienta Gorda (*Pimenta dioica L. Merrill*) en Lecho Fluidizado (sitio de internet). Universidad Autónoma del Estado de México, Dpto. de Ingeniería Química, Facultad de Química. Disponible en <http://www.respyn.uanl.mx/especiales/2008/ee-08-2008/.../A010>. Acceso enero 2013.