

MODELADO DE LA CINÉTICA DE SECADO DEL AFRECHO DE YUCA (*Manihot esculenta* Crantz)

EMODELING OF DRYING KINETICS OF CASSAVA BAGGASE (*Manihot esculenta* Crantz)

J.G. Salcedo-Mendoza*, K. Contreras-Lozano, A. García-López y A. Fernandez-Quintero.

Universidad de Sucre. Cra 28 # 5-267 Barrio Puerta Roja, Sincelejo, Sucre (Colombia), Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Agroindustrial.

Recibido 20 de marzo de 2015; Aceptado 9 de octubre de 2016

Resumen

El afrecho de yuca es un material semisólido con elevado contenido de humedad, obtenido como residuo en el proceso de extracción de almidón nativo de yuca. Se evaluó el efecto de la temperatura y la velocidad del aire sobre la velocidad de secado del afrecho de yuca, ajustándose a modelos matemáticos que describen la cinética de secado. Además, se determinó el coeficiente de difusividad efectiva para las condiciones del proceso. Los resultados mostraron un efecto significativo de la temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado, el menor tiempo de secado fue de 11 h para las condiciones de 50°C y 3.4 m/s, lográndose una reducción del 88% de la humedad inicial en el afrecho hasta un valor final de 10%. El modelo que mejor describe el comportamiento de la cinética de secado del afrecho fue el modelo de Wang y Singh con un R2 entre 0.9996-0.9955 y valores de los residuos MAE < 0.0213 y RMSE < 0.0006. El coeficiente de difusividad efectiva presentó valores entre 2.5438×10^{-11} y 1.5027×10^{-10} que se encuentra dentro del intervalo general para productos agrícolas.

Palabras clave: secado, yuca, difusividad, humedad.

Abstract

Cassava bagasse is a semisolid material with high moisture content, obtained as residue in the process of extraction of native cassava starch. The effect of temperature on drying rate of cassava bagasse was evaluated, adjusting to mathematical models that describe the drying kinetics. Furthermore, the effective diffusion coefficient for the process conditions was determined. The results showed a significant effect of temperature and air velocity on the drying time, the shorter drying time was 11 h for the conditions of 50°C and 3.4 m/s, achieving a reduction of 88% initial moisture in the mash to a final value of 10%. The model that best describes the behavior of drying kinetics of bran was the model of Wang y Singh with R2 between 0.9996 to 0.9955 and MAE values ≤ 0.0213 and RMSE ≤ 0.0006 . The effective diffusion coefficient showed values between 2.5438×10^{-11} and 1.5027×10^{-10} which is within the general range for agricultural products.

Keywords: cassava, diffusivity, moisture.

1 Introducción

Entre los residuos sólidos del proceso de extracción de almidón nativo de yuca se destaca el afrecho de yuca que es un material semisólido fibroso generado en grandes volúmenes ya que representa hasta el 30% del peso de las raíces de yuca que entran al proceso. Su contenido de humedad es elevado (> 80%) y se puede convertir en problema ambiental si es desechado sin ningún tratamiento, además podría ser reincorporado al ciclo productivo y ser aprovechado por las empresas que lo generan (Marmolejo y col., 2008). Actualmente en Colombia algunas pequeñas empresas productoras de almidón de yuca someten el

afrecho a un secado natural para luego comercializarlo como alimento animal, pero no se ha profundizado en la aplicación de métodos de secado artificial para facilitar su manejo y explotación.

El secado es un proceso de transferencia simultánea de calor y masa, que consiste básicamente en retirar por evaporación la humedad contenida en un producto hasta un contenido específico y transferirla al aire circundante, generalmente mediante convección forzada (Ertekin y Yaldiz, 2004; Minea, 2013). La rapidez del proceso, y por lo tanto la cinética de secado, depende de las características

* Autor para la correspondencia. E-mail: jairo.salcedo@unisucra.edu.co

del aire (temperatura, humedad relativa, velocidad de circulación) y del producto (composición, contenido de humedad, geometría) (Oti-Boateng y Axtell, 1998; Krokida y col., 2003).

El secado es un método ampliamente utilizado para preservar o prolongar la vida útil de algunos productos biológicos y alimentarios, siendo un proceso muy complejo debido a la estructura y el comportamiento interno de estos productos, lo que hace necesario un estudio previo que permita determinar las condiciones y parámetros a tener en cuenta para garantizar la calidad del producto y costos operativos mínimos (Montes y col., 2008; Defraeye 2014; Kumar y col., 2014).

En la literatura se describen ampliamente los mecanismos de energía y transporte de materia involucrada en el proceso de secado, que involucra fenómenos internos con una base física fuerte, pero la difusividad es un mecanismo de transporte importante debido al movimiento aleatorio de las moléculas que permiten el transporte de la humedad. Los modelos basados en este parámetro comprenden procesos como el flujo capilar, difusión del líquido, la difusión del vapor y la evaporación/condensación local, todos ellos se asocian en un único parámetro llamado difusividad efectiva (Putranto y Chen, 2015; Vasic y col., 2014; Virgen-Navarro y col., 2016).

El modelado es necesario para evaluar el efecto de los parámetros y optimizar el proceso de secado, por ello, hay una gran necesidad de modelos estables y fiables que podrían describir, cuantificar y predecir el proceso de secado (Erbay y Icier, 2010; Chen y col., 2013; Vasic y col., 2014). Los modelos se derivan generalmente de la ley de enfriamiento de Newton y la segunda ley de difusión de Fick (Kumar y col., 2012; Ruiz-López y col., 2012). Entre estos se encuentran el modelo de Newton, Exponencial de dos términos, Wang y Singh, Henderson y pabis, Difusión aproximada, Logarítmico y Page. Estos han sido aplicados en la cinética de secado de productos alimenticios, incluyendo la yuca y productos derivados de esta (Lertworasirikul, 2008; Ajala y col., 2012; Salcedo-Mendoza y col., 2014; Torregroza-Espinosa y col., 2014). El objetivo del presente trabajo es estudiar y modelar la cinética de secado del afrecho de yuca, determinando el efecto de la temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado y la difusividad efectiva, con potencial de aplicación en el desarrollo y diseño de equipos para la deshidratación del afrecho de yuca.

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales y equipos

El afrecho de yuca derivado de un proceso industrial de obtención de almidón de yuca fue suministrado por la empresa Almidones de Sucre S.A.S ubicada en el Departamento de Sucre, Colombia. La humedad inicial se determinó mediante el método de estufa a 105°C por 4 horas hasta peso constante (AOAC, 2004).

Se utilizó un secador de bandejas a escala de laboratorio TD-S/EV (ELECTTRONICA VENETA, TREVISO, ITALIA), construido en acero inoxidable AISI 304. Consta de una cámara de secado de 450 × 450 × 450mm, la cual contiene cuatro bandejas de acero inoxidable de 400 × 300 × 68 mm para una capacidad de carga máxima de 3500 g. Posee un sistema de control PID (Proportional-Integral-Derivative) de velocidad del aire, con motor trifásico (potencia de 0.3 Kw, velocidad máxima de 1400 rpm y caudal máximo de 3.1 m³/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 10 m/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, BALINGEN, ALEMANIA), con una exactitud ± 0.01 g y con divisiones de 0.1g y carga de 0 a 400 g.

2.2 Construcción de las curvas de secado

Inicialmente se establecieron las condiciones de secado en el equipo hasta que se mantuvieron estables, introduciendo entonces las muestras de afrecho que fueron previamente depositadas con un espesor uniforme de 0.7 cm en dos bandejas, ubicadas en un soporte acoplado a la balanza analítica. Se determinó la pérdida de peso de las muestras a intervalos de tiempo entre 5 y 15 minutos.

Tabla 1. Modelos matemáticos de secado (Ertekin y Yaldiz, 2004)

Modelo	Ecuación ¹	
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ec. 5
Exponencial de dos términos	$MR = \exp(-kt) + 1(1 - a)\exp(-kat)$	Ec. 6
Wang y Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Ec. 7
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + 1(1 - a)\exp(-kbt)$	Ec. 8
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Ec. 9
Page modificado	$MR = \exp(-kt)^n$	Ec. 10
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Ec. 11
Henderson y Pabis modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Ec. 11
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	Ec. 12

¹ Donde MR es la razón de humedad; t es el tiempo de secado (horas) k, a, b, c, g,h y n son constantes derivadas del ajuste al modelo.

Para la construcción de curvas de secado se aplicó el método propuesto por (Geankoplis, 1998). Se estableció la humedad de equilibrio aplicando el modelo matemático de GAB (Van den Berg y Bruin, 1981) que se observa en la Ec. (1), este fue objeto de estudio previo mostrando buen ajuste con coeficientes de determinación $R^2 > 0.97$ y valores de error medio relativo EMR $< 0.2\%$.

$$X_e = \frac{X_m C(a_w)}{[1 - K(a_w)][1 - K(a_w) + CK(a_w)]} \quad (1)$$

Donde X_e es la humedad de equilibrio (Kg agua/Kg masa seca); a_w , es la actividad de agua; X_m , es la humedad de la monocapa de GAB (Kg agua/ Kg masa seca), las constantes C de Guggenheim y K son factores de corrección relacionados con el calor de sorción de la monocapa y multicapa respectivamente.

A partir de estos datos el contenido de humedad libre X (Kg agua/ Kg masa seca) fue calculado para cada tiempo (t) de secado y posteriormente fueron construidas las curvas de velocidad de secado R (Kg agua/h*m²) en función de la humedad libre en base seca (X). Para la determinación matemática del modelo cinético se estableció la razón de humedad (MR) o fuerza impulsora reducida (Ec. (2)) que relaciona el gradiente de la humedad de la muestra en función del tiempo con la humedad inicial y la humedad de equilibrio (Park y col., 2002; Akpinar y col., 2003; Babalis y Belessiotis, 2004; Simat y col., 2005).

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

Donde, MR es la razón de humedad, X es la humedad libre en base seca en cada tiempo, X_e es la humedad de equilibrio y X_0 es la humedad libre inicial, todas se expresan como Kg agua/ Kg masa seca. D_f (m²/s) es la difusividad efectiva y l (m) es el espesor del material a secar.

2.3 Modelamiento de la cinética de secado

A partir de la curva MR se evaluaron algunos modelos matemáticos (Tabla 1) comúnmente aplicados en la literatura, con el fin de determinar qué modelo describe mejor la cinética de secado del afrecho de yuca. Se aplicó el método de regresión no lineal empleando como criterios estadísticos de ajuste el coeficiente de determinación (R^2), el error porcentual absoluto medio (MAE), y cuadrado medio del error (RMSE) expresados en las ecs. (3) y (4).

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

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

Donde, MR_{mod} es la razón de humedad que determina el modelo y MR_{exp} es la razón de humedad calculada a partir de los datos experimentales.

2.4 Determinación de la difusividad efectiva

A partir de los datos obtenidos de la curva de secado de la razón de humedad (MR) en función del tiempo, se determinó la difusividad efectiva D_f (m^2/s) derivada de la aplicación de la segunda ley de Fick para una geometría de lámina infinita para tiempos largos mediante la Ec. (2), donde l es el espesor de muestra en metros (Geankoplis, 1998). Al graficar logaritmo de MR en función del tiempo en segundos, resulta una línea recta de cuya pendiente se calculó la D_f para cada temperatura y velocidad de aire aplicada.

2.5 Diseño experimental y análisis estadístico

El proceso de secado fue evaluado aplicando un diseño experimental rotacional compuesto (Tabla 2), teniendo como factores la temperatura de bulbo seco (40 - 60 °C) y la velocidad del aire de secado (1.0 - 3.0 m/s) para un total de 10 unidades experimentales con dos puntos centrales para cada factor, 4 axiales y 4 correspondientes a la combinación de factores. Para el análisis de los datos y con base al diseño experimental implementado se aplicó un análisis de varianza (AVOVA multifactorial) con un nivel de confianza del 95% para evaluar el efecto de la temperatura y velocidad del aire en el tiempo de secado y la difusividad efectiva.

Tabla 2. Diseño experimental para el secado del afrecho de yuca

Tratamientos	Temperatura (°C)	Velocidad del aire (m/s)
T1	50	2
T2	60	3
T3	50	0,585786
T4	60	1
T5	40	1
T6	50	3,41421
T7	64,1421	2
T8	35,8579	2
T9	50	2
T10	40	3

3 Resultados y discusión

3.1 Curvas de secado del afrecho de yuca

En la Fig. 1 que muestra la pérdida de humedad en función del tiempo; para todas las condiciones de secado se observa una gran influencia de las condiciones de temperatura y velocidad de aire sobre el tiempo de secado, evidenciándose un comportamiento similar al de la superficie de respuesta (Fig. (2)) donde el tiempo de secado aumenta significativamente a bajos niveles de temperatura y velocidad del aire. Este fenómeno se corrobora en el análisis de varianza que muestra un efecto significativo de los dos factores estudiados sobre el tiempo de secado ($p > 0.05$), principalmente la temperatura. Este último factor es determinante debido a que la transferencia de calor del aire hacia la muestra aumenta con la temperatura y como consecuencia incrementa la transferencia de masa (Aghbashlo y col., 2009), fenómenos que se reflejan en el incremento de la velocidad de pérdida de humedad libre. Los resultados son acordes a lo encontrado en yuca y sus derivados (Ajala y col., 2012; Salcedo-Mendoza y col., 2014; Torregroza-Espinosa y col., 2014), y otros productos agroalimentarios (Ertekin y Yaldiz 2004; Falade y col., 2007; Ocampo, 2006; Montes y col., 2008; Vega y col., 2005; Mohammadi y col., 2008). Los menores tiempos de secado fueron 11 y 12 h que se obtuvieron a 50°C - 3.4 m/s y 64.1°C - 2 m/s respectivamente. A esas condiciones se alcanzó la mínima humedad final que fue 10%, lo que significa una reducción del 88% de humedad presente en el afrecho de yuca.

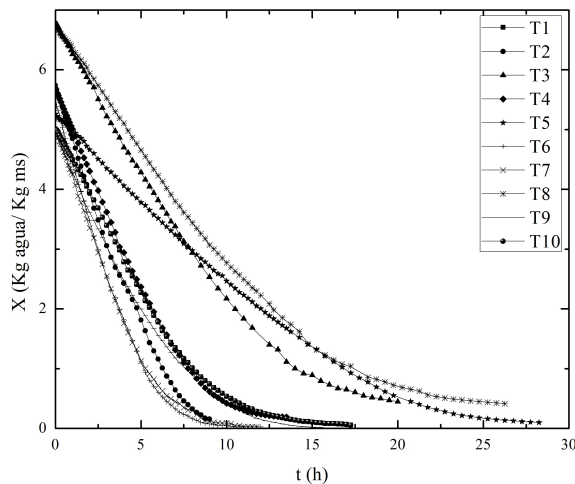


Fig. 1. Pérdida de humedad libre durante el secado del afrecho de yuca

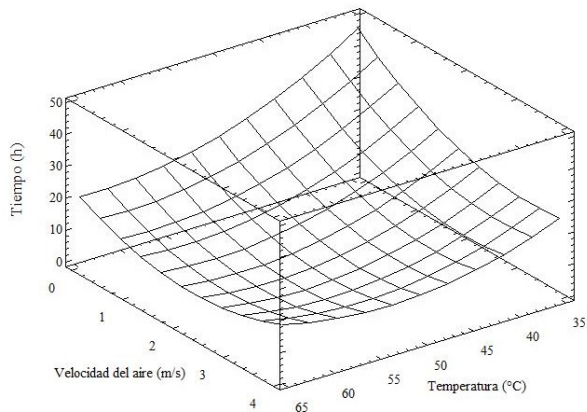


Fig. 2. Superficie de respuesta para el tiempo de secado del afrecho de yuca

El tiempo de secado más prolongado fue de aproximadamente 28 h a las condiciones de 40°C y 1 m/s, notándose en la curva el periodo inicial de ajuste no estacionario. Se observa en todas las condiciones de secado que la humedad libre decrece linealmente en las primeras horas del proceso de secado, lo que indica una mayor velocidad de eliminación de la humedad en este periodo debido a que el porcentaje de humedad en la muestra es alto (Ajala y col., 2011). Un comportamiento similar se observó en los tratamientos de 50°C a 0.58 m/s y 38°C a 2 m/s.

En la Fig. (3) se observan las curvas de velocidad de secado para todas las condiciones de proceso. Se distinguen dos fases, el periodo de velocidad constante y el de velocidad decreciente, y sólo en los tratamientos T2, T3, T7, T8, T9, T10 se observa el periodo de inducción. El afrecho de yuca tiene una humedad inicial elevada superior a los 5 g agua/g ms (masa seca), por lo que en el periodo de inducción se produce un incremento gradual de la difusión de humedad debido al precalentamiento y por lo tanto de la velocidad de secado debido a que la humedad del material es suficiente para mantener una condición saturada en la superficie (Sandoval-Torres y col., 2006; Ruiz-López y col., 2012). Se evidencia en todas las curvas de secado el periodo estacionario donde la energía del aire de secado se utiliza principalmente para la evaporación del agua.

Finalmente; se encuentra la etapa de velocidad decreciente de secado, que predomina en relación a la etapa anterior ya que la humedad libre se difunde con menor velocidad a través del sólido como se ha señalado anteriormente por algunos autores, por lo que es el periodo más estudiado en el proceso de secado de diversos productos agroalimentarios (Hernández

y col., 2011; Carranza y Sánchez 2002; Salcedo-

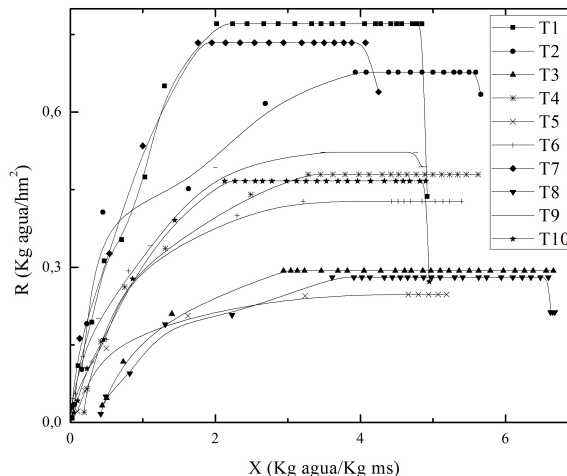


Fig. 3. Velocidad de secado del afrecho de yuca Mendoza y col., 2014; Montes y col., 2008).

3.2 Modelación matemática de la cinética de secado

La Tabla 3 muestra los parámetros estadísticos de ajuste de las curvas de secado. Todos los modelos presentaron un buen ajuste a los datos experimentales. En general los valores de R^2 son superiores a 0.97; los residuos MAE y RMSE fueron menores a 0.0514 y 0.0035, respectivamente. Teniendo en cuenta estos criterios estadísticos los modelos que presentaron los mejores ajustes en orden descendente son, el de Wang y Singh, Difusión aproximal, Henderson y Pabis modificado, Logaritmico y el de Page; todos con $R^2 > 0.99$. Sin embargo, el modelo seleccionado como el apropiado para explicar el comportamiento de la razón de humedad en el secado de afrecho de yuca es el de Wang y Singh por tener valores más altos de R^2 (0.9996-0.9955) y menores valores de los residuos MAE (< 0.0213) y RMSE (< 0.0006). Los valores de las constantes para cada uno de los modelos estudiados se encuentran en la Tabla 3.

Para el modelo de Wang y Singh la constante “a” tiene valores de -0.0864 a -0.2220, y la contante “b” entre 0.0010 y 0.0099. Ninguna de las dos constantes se vio afectada significativamente por la temperatura y velocidad del aire de secado ($p < 0.05$), aunque se ha señalado que estos parámetros podrían estar más ligados a la estructura del tejido del alimento y a la velocidad de aire más que a la temperatura de secado (Vega y Lemus, 2003).

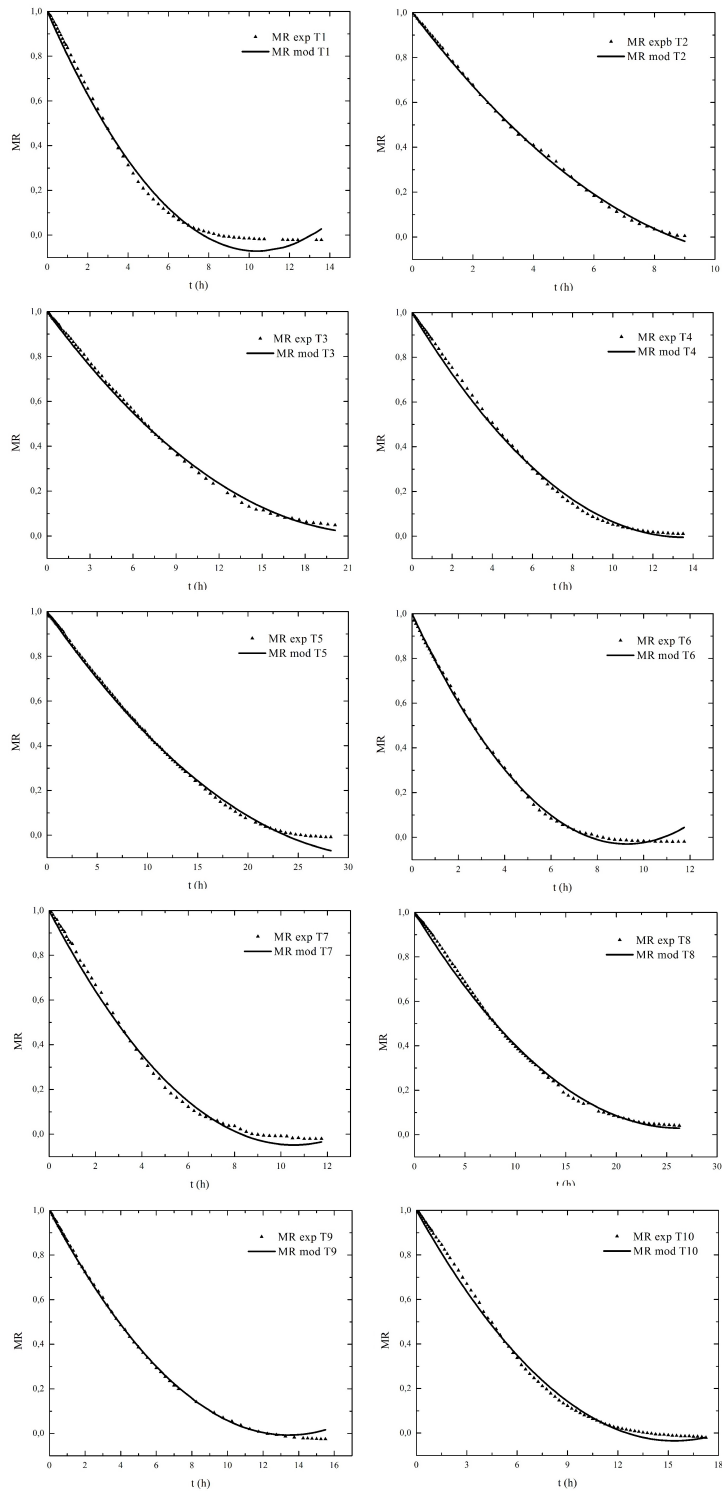


Fig. 4. Datos experimentales de la razón de humedad durante el secado del afrecho de yuca, ajustados al modelo de Wang y Singh.

Tabla 3. Parámetros de ajuste de la cinética de secado del afrecho de yuca a modelos matemáticos

Modelo	Parámetros ¹	Tratamientos									
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Newton	R ²	0.9608	0.97	978,043	971,204	967,568	972,963	964,163	979,611	980,762	965,021
	MAE	0.0647	0.05	0.0432	0.0555	0.0476	0.0488	0.0616	0.0407	0.0373	0.061
	RMSE	0.005	0.00	0.0024	0.0037	0.0034	0.0032	0.0046	0.0022	0.002	0.0045
Exponencial de dos términos	k	0.2832	0.2481	0.1108	0.2024	0.087	0.3021	0.2712	0.0942	0.194	0.1857
	R ²	975,747	976,771	984,954	980,253	974,424	978,951	977,914	986,627	986,701	977,079
	MAE	0.0496	0.0455	0.0361	0.0457	0.0427	0.0438	0.0473	0.0337	0.03	0.0487
Wang y Singh	RMSE	0.0032	0.0028	0.0017	0.0026	0.0027	0.0026	0.0029	0.0015	0.0014	0.003
	k	0.3201	0.2711	0.1198	0.2218	0.0937	0.3256	0.3046	0.1019	0.2085	0.2062
	a	0.9017	0.929	0.9436	0.9189	0.942	0.9401	0.9057	0.9384	0.9484	0.9084
Difusión aproximada	R ²	995,551	999,158	998,355	997,879	999,218	999,309	995,839	998,008	999,688	996,194
	MAE	0.0213	0.0085	0.0117	0.0144	0.0073	0.0074	0.0208	0.0118	0.0049	0.0192
	RMSE	0.0006	0.0001	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001	0.0005	0.0002	0	0.0005
Page	a	-0.2058	-0.1778	-0.0864	-0.1483	-0.0647	-0.222	-0.1987	-0.0737	-0.1502	-0.1348
	b	0.0099	0.0072	0.0019	0.0055	0.001	0.012	0.0094	0.0014	0.0056	0.0044
	R ²	995,823	998,581	998,426	996,508	993,250	998,120	996,891	999,230	998,710	996,695
Page modificado	MAE	0.0198	0.0107	0.0114	0.0192	0.0216	0.0112	0.0175	0.0076	0.0101	0.0181
	RMSE	0.0006	0.0002	0.0002	0.0005	0.0007	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001	0.0004
	k	0.6452	0.0812	0.2229	0.4018	0.1775	0.0896	0.5698	0.1923	0.0672	0.3841
Henderson y Pabis	a	-44,621	43,471	-148,211	-228,608	-157,912	-60,567	-181,600	-88,879	-119,341	-229,916
	b	0.8327	0.621	0.951	0.9643	0.9515	12,290	0.9533	0.9197	11,056	0.962
	R ²	997,608	993,607	998,429	997,555	994,161	994,087	998,212	999,280	997,204	998,273
Henderson y Pabis modificado	MAE	0.0152	0.0232	0.0115	0.016	0.0215	0.0241	0.0134	0.0075	0.0141	0.0129
	RMSE	0.0003	0.0008	0.0002	0.0003	0.0006	0.0007	0.0002	0.0001	0.0003	0.0002
	k	0.1561	0.148	0.057	0.1	0.0332	0.2043	0.1496	0.0442	0.1264	0.0795
Henderson y Pabis modificado	n	14,717	13,672	13,205	14,143	14,064	13,227	14,528	13,295	12,804	14,812
	R ²	960,888	967,948	978,043	971,204	967,568	972,963	964,163	979,611	980,762	965,021
	MAE	0.0647	0.054	0.0432	0.0555	0.0476	0.0488	0.0616	0.0407	0.0374	0.061
Henderson y Pabis modificado	RMSE	0.0052	0.0039	0.0024	0.0038	0.0034	0.0033	0.0047	0.0023	0.002	0.0046
	k	0.5214	0.4938	0.0333	0.3181	0.2951	17,381	0.5224	0.3068	0.4406	13,628
	R ²	975,800	976,792	984,962	980,284	974,436	978,963	977,963	986,637	986,707	977,126
Henderson y Pabis modificado	MAE	0.0495	0.0454	0.0361	0.0456	0.0427	0.0437	0.0472	0.0337	0.03	0.0486
	RMSE	0.0032	0.0028	0.0017	0.0026	0.0027	0.0026	0.0029	0.0015	0.0014	0.003
	k	0.3164	0.27	0.1194	0.0063	0.0934	0.3244	0.3021	0.1015	0.208	0.2047
Henderson y Pabis modificado	a	10,985	10,716	10,565	0.0158	10,580	10,600	10,947	10,616	10,517	10,922
	R ²	998,596	998,675	999,435	996,014	992,490	997,910	995,702	998,908	999,015	995,220
	MAE	0.0111	0.0101	0.0064	0.0202	0.0217	0.0126	0.0204	0.0089	0.0085	0.0216
Henderson y Pabis modificado	RMSE	0.0002	0.0002	0.0001	0.0006	0.0008	0.0003	0.0006	0.0001	0.0001	0.0007
	k	12,067	0.15	0.6708	0.3191	0.2736	0.1821	0.1827	0.2941	0.1372	0.1325
	a	56,102	0.6331	0.5465	0.9232	-0.8091	10,857	10,847	-0.7456	0.6176	0.7981
Logaritmico	b	90,951	0.2481	18,385	10,130	-0.7874	0.3351	0.2484	-0.7385	0.2158	0.1815
	g	10,060	-0.0412	0.3775	0.596	0.1326	-0.0043	-0.0173	0.1406	-0.0155	-0.0225
	c	45,039	0.6331	23,016	10,607	0.9955	0.2594	0.2111	0.9921	0.6176	0.4311
Logaritmico	h	0.5933	0.15	0.1903	0.3018	0.1316	0.1807	0.1934	0.1404	0.1372	0.1319
	R ²	995,794	998,823	997,043	995,230	998,503	997,934	995,863	995,969	999,091	995,550
	MAE	0.0199	0.0094	0.0151	0.0214	0.0098	0.0124	0.0201	0.0174	0.0081	0.0207
Logaritmico	RMSE	0.0006	0.0001	0.0003	0.0006	0.0002	0.0003	0.0006	0.0005	0.0001	0.0006
	k	0.1732	0.1283	0.0756	0.1431	0.0455	0.1774	0.1727	0.0724	0.1297	0.12
	a	14,253	15,276	13,098	12,653	15,462	13,764	13,853	12,258	13,186	13,553
Logaritmico	c	-0.38	-0.5118	-0.2859	-0.2261	-0.5332	-0.3674	-0.3402	-0.1919	-0.3002	-0.3108

¹ Donde R² (Coeficiente de determinación), MAE (Error porcentual absoluto medio) y MRSE (Cuadrado medio del error) son los parámetros estadísticos del ajuste; k, a, b, c, g, h y n son constantes derivadas del ajuste para cada modelo.

En cuanto a la constante k (s⁻¹) presente en los modelos de Newton, Difusión aproximada, Exponencial de dos términos, Page, Page modificado, Henderson y Pabis, Henderson y Pabis Modificado y Logaritmico, algunos autores han reportado la influencia de la temperatura en esta variable ya que su valor es más alto a medida que aumenta la temperatura (Vega y col., 2007), sin embargo en afrecho de yuca solo la constante del modelo de Difusión aproximada tiene este comportamiento, y en los demás casos “k” disminuye cuando la temperatura se incrementa.

De los resultados es posible inferir que el ajuste del modelo más apto para describir la cinética de secado para un determinado producto depende en gran medida las condiciones características del producto y del proceso de secado; ya que este describe el comportamiento de la razón de humedad, la cual encuentra en

función de la difusividad efectiva propia del material, el tiempo de secado y el espesor utilizado del material durante el proceso.

3.3 Difusividad efectiva

El coeficiente de difusividad efectiva para las condiciones de secado del afrecho de yuca presentó valores entre 2.5438×⁻¹¹ y 15027×⁻¹⁰ m²/s, que se encuentran dentro del intervalo general para productos agrícolas 10⁻¹¹ - 10⁻⁹ m²/s (Madamba y col., 1996). También se encuentran dentro del rango encontrado por Salcedo-Mendoza y col. (2014) en yuca de 1.261×⁻¹⁰ a 4.137×⁻¹⁰ m²/s, e inferiores a los encontrados por (Torregroza-Espinosa y col., 2014) de 2.58675×⁻¹⁰ a 1.76959×⁻⁹ m²/s en la misma fuente a condiciones similares de temperatura en el proceso. Fernando y col.

(2011) reportaron valores más bajos del coeficiente de difusividad entre 5.0941 y 5.2110×10^{-9} a mayores temperaturas. Igualmente en productos derivados del tubérculo se han reportado valores inferiores del coeficiente difusivo a temperaturas más altas de secado (Ajala y col., 2012; Lertworasirikul, 2008). Chen (2007) explica que la variabilidad de la difusividad efectiva depende de las condiciones de secado, la estructura y composición del material y los tamaños de muestra.

Conclusiones

Las curvas de secado del afrecho de yuca muestran un periodo de inducción, debido al alto contenido de humedad inicial del material; y un periodo de velocidad constante, que es donde se presenta la mayor rapidez de remoción de agua, y el cual se extiende en un amplio rango de humedad libre, lo que indica que gran parte del agua presente en el residuo se encuentra no ligada y es posible retirarla aplicando el proceso de secado artificial. Los modelos comúnmente aplicados en la literatura para modelar la cinética de secado mostraron un buen ajuste al secado de afrecho de yuca con $R^2 > 0.97$, $MAE < 0.0514$ y $RMSE < 0.0035$, por lo que pueden interpretar el fenómeno de secado del afrecho de yuca, siendo el modelo más apto el de Wang y Singh que es empírico. El coeficiente de difusividad efectiva para las condiciones estudiadas se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura para productos agrícolas entre ellos la yuca.

Nomenclatura

A	Parámetro de ajuste del modelo
a_w	Actividad de agua
B	Parámetro de ajuste del modelo
C	Parámetro de ajuste del modelo
C	Parámetro de ajuste del modelo de GAB
k	Parámetro de ajuste del modelo de
D_f	Coefficiente de difusividad efectiva, m^2/s
K	Factor de corrección del modelo de GAB
l	Espesor de la muestra, m
MAE	Error porcentual absoluto medio
MR	Razón de humedad
MR	Razón de humedad
MR_{mod}	Razón de humedad determinada por el modelo
MR_{exp}	Razón de humedad determinada por datos experimentales
RMSE	Cuadrado medio del error
R	Velocidad de secado, Kg/hm^2
R^2	Coefficiente de determinación
t	Tiempo de secado, s
T	Temperatura de secado, $^{\circ}C$
V	Velocidad de secado, m/s
X	Humedad libre, Kg agua/ Kg masa seca
X_e	Humedad de equilibrio, Kg agua/ g masa seca
X_0	Humedad libre inicial, Kg agua/ Kg masa seca
X_m	Humedad de la monocapa de GAB, Kg agua/ Kg masa seca

Referencias

- Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Khani, S., & Ghasemi, M. (2009). Mathematical modelling of thin-layer drying of carrot. Polish Academy of Sciences Journal, 23, 313 - 317.
- Ajala, A. S., Aboiye, A. O., Popoola, J. O., & Adeyanju, J. A. (2012). Drying Characteristics and Mathematical Modelling

of Cassava Chips. Chemical and Process Engineering Research, 4, 1 - 9.

- Ajala, A. S., Falade, K. O., & Tunde- Akintunde, T. Y. (2011). Effect of osmotic pretreatment on the drying kinetics of okra (*Hibiscus esculentus*). Journal of Engineering and Technology, 6, 41 - 44.
- Akpinar, E., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering, 59, 99 - 104.
- AOAC. (2004). Official Method of Analysis. (12th ed.). AOAC International, Washington D.C.
- Babalís, S. J., & Belessiotis, V. G. (2004). Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. Journal of Food Engineering, 65, 449 - 458.
- Carranza, J., & Sánchez, M. (2002). Cinética de secado de Musa paradisíaca L. "PLÁTANO" Y Manihot esculenta Grantz "YUCA". Revista Amazónica de Investigación Alimentaria, 2, 15 - 25.
- Chen, D., Zheng, Y., & Zhu, X. (2013). In-depth investigation on the pyrolysis kinetics of raw biomass. Part I: Kinetic analysis for the drying and devolatilization stages. Bioresource Technology, 131, 40 - 46.
- Chen, X. D. (2007). Moisture diffusivity in food and biological materials. Drying Technology, 25, 1203 - 1213.
- Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes - A review. Applied Energy, 131, 323 - 344.
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 50, 441 - 464.
- Ertekin, C., & Yaldiz, O. (2004). Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. Journal of Food Engineering, 63, 349 - 359.
- Falade, K., Olurin, T., Ike, E., & Aworh, O. (2007). Effect of pretreatment and temperature on air-drying of *Discorea alata* and *Discorea rotundata* slices. Journal of Food Engineering, 80, 1002 - 1020.
- Fernando, W. J. N., Low, H. C., & Ahmad, A. L. (2011). Dependence of the effective diffusion coefficient of moisture with thickness and temperature in convective drying of sliced materials. A study on slices of banana, cassava and pumpkin. Journal of Food Engineering, 102, 310 - 316.
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Capítulo 9: Secado de materiales de proceso. (3rd ed., pp. 579 - 649). Compañía editorial continental, S.A., México.
- Hernández, C., Ossa, Z., Ramírez, L., & Herrera, W. (2011). Influencia del espesor y la temperatura en el secado de Carambola. Ingenierías & Amazonia, 4, 131 - 142.
- Krokida, M. K., Karathanos, V., Maroulis, Z., & Kouris, D. M. (2003). Drying kinetics of some vegetables. Journal of Food Engineering, 59(4), 391 - 403.
- Kumar, C., Karim, A., Saha, S. C., Joardder, M. U. H., Brown, R. J., & Biswas, D. (2012). Multiphysics modelling of convective drying of food materials. Proceedings of the Global Engineering, Science and Technology Conference. Global Institute of Science and Technology.
- Kumar, C., Karim, M. A., & Joardder, M. U. H. (2014). Intermittent drying of food products: A critical review. Journal of Food Engineering, 121, 48 - 57.

- Lertworasirikul, S. (2008). Drying kinetics of semi-finished cassava crackers: A comparative study. *LWT*, 41, 1360 - 1371.
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75 - 97.
- Marmolejo, L., Pérez, A., Torres, P., Cajigas, A., & Cruz, C. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos generados en pequeñas industrias de almidón agro de yuca. *Livestock Research for Rural Development*, 20, 17.
- Minea, V. (2013). Drying heat pumps e Part II: Agro-food, biological and wood products. *International Journal of Refrigeration*, 36, 659 - 673.
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Keyhame, A., & Emam-Djomeh, Z. (2008). Estimation of Thin-layer Drying Characteristics of Kiwifruit (cv. Hayward) with Use of Page's Model. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 2, 802 - 805.
- Montes, E. J. M., Pizarro, R. T. G. R. D. A., Sierra, O. A. P., Escobar, J. L. M., & Herazo6, I. I. M. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Revista Ingeniería E Investigación*, 28, 45 - 52.
- Ocampo, A. (2006). Modelo cinético del secado de la pulpa de mango. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA*, 5, 93 - 28.
- Oti-Boateng, P., & Axtell, B. (1998). *Técnicas de Secado. Libro de Consulta Sobre Tecnologías Aplicadas al Ciclo Alimentario* (2nd ed., p. 70). Perú: Intermediate Technology Development Group.
- Park, K., Vohnikova, Z., & Reisbros, F. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*, 51, 193 - 199.
- Putranto, A., & Chen, X. D. (2015). An assessment on modeling drying processes: Equilibrium multiphase model and the spatial reaction engineering approach (S-REA). *Chemical Engineering Research and Design*, 94, 660 - 672.
- Ruiz-López, I. I., Ruiz-Espinosa, H., Arellanes-Lozada, P., Bárcenas-Pozos, M. E., & García-Alvarado, M. A. (2012). Analytical model for variable moisture diffusivity estimation and drying simulation of shrinkable food products. *Journal of Food Engineering*, 108, 427 - 435.
- Salcedo-Mendoza, J., Mercado, J. L., M., V., Fernández, A., Vertel, M. L., & Ruiz, L. E. (2014). Cinética de secado de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) variedad CORPOICA M-tai en función de la temperatura y de la velocidad de aire. *Rev. Ion.*, 27, 29 - 42.
- Sandoval-Torres, S., Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L., Sánchez-Ramírez, J. (2006). Rapidez de secado reducida: una aplicación al secado convectivo de plátano Roatán. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5, 35 - 38.
- Simat, S., Femenia, A., Garau, M. C., Femenia, A., & Roselló, C. (2005). Drying of red pepper (*Capsicum Annuum*): Water desorption and quality. *International Journal of Food Engineering*, 1, 1 - 13.
- Torregroza-Espinosa, A. M., Montes-Montes, E. J., Ávila-Gómez, A. E., & Remolina-López, J. F. (2014). Modelado de las cinéticas de secado de tres variedades de yuca industrial. *DYNA*, 81, 184 - 192.
- Van den Berg, C., & Bruin, S. (1981). Water activity, influence on food quality. (B. Rockland & G. E. Stewart, Eds.) (p. 45). New York: Academic Press.
- Vasic, M., Grbavcic, Z., & Radojevic, Z. (2014). Determination of the moisture diffusivity coefficient and mathematical modeling of drying. *Chemical Engineering and Processing*, 76, 33 - 44.
- Vega, A., Andres, A., & Fito, P. (2005). Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo (*Capsicum annum* L. cv Lamuyo). *Información Tecnológica*, 16, 3 - 11.
- Vega, A., & Lemus, R. (2003). Modelado de la cinética de secado de papaya chilena (*basconcellea pubescens*). *Información Tecnológica*, 17, 23 - 31.
- Vega, A., Uribe, E., Lemus, R., & Miranda, M. (2007). Hot-air drying characteristics of Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) and influence of temperature on kinetic parameters. *LWT*, 40, 1698 - 1707.
- Virgen-Navarro, L., Herrera-López, E.J., & Espinosa-Andrews, H. (2016). Estimación del coeficiente de difusividad durante el tostado de café en un lecho fuente utilizando un modelo difuso. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15, 513 - 524.