

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSFERENCIA DE MASA Y
CALOR DURANTE EL SECADO DE CÁSCARA DE SANDÍA (*Citrullus lanatus*).

FABIO ESTEBAN HERRERA ROCHA

WILSON ANDRES CASTILLO ASCANIO

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniería Agroindustrial

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

VALLEDUPAR-CESAR

2018

Notas de aceptación

Firma del presidente de jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Valledupar, 13 de febrero del 2019

TABLA DE CONTENIDO

	PÁG
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	3
4. ANTECEDENTES.....	4
5. MARCO TEÓRICO	7
5.1. Sandía.....	7
5.2. Secado.....	8
5.3. Humedad.....	9
5.3.1. Humedad en base húmeda (x').....	9
5.3.2. Humedad en base seca (X_t).....	9
5.3.3. Relación entre base húmeda y base seca	10
5.4. Contenido de humedad de equilibrio de los materiales	10
5.5. Curvas de secado	10
5.6. Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado.....	12
5.7. Parámetros de transferencia de masa	14
5.7.1. Coeficiente de transferencia de masa.	14
5.7.2. Difusividad efectiva.....	14
5.8. Parámetros de transferencia de calor	14
5.8.1. Coeficiente de transferencia de calor.....	14
6. OBJETIVOS.....	16
6.1. Objetivo general.....	16
6.2. Objetivos específicos	16
7. MATERIALES Y MÉTODOS	17
7.1. Tipo y enfoque de la investigación	17
7.2. Recolección de la información	17
7.2.1. Fuentes primarias.	17
7.2.2. Fuentes secundarias.....	17
7.3. Población.	17
7.4. Procedimiento	17
7.4.1. Obtención y adecuación de la materia prima.....	17

7.4.2.	Determinación de la humedad inicial.....	18
7.4.3.	Construcción de la curva de secado.....	18
7.4.5.	Determinación de la difusividad efectiva.....	20
7.4.6.	Modelado matemático.....	21
7.4.7.	Análisis estadístico.....	22
7.4.8.	Determinación del coeficiente de transferencia de calor.....	23
7.4.9.	Determinación del coeficiente de transferencia de masa.....	24
7.4.10.	Diseño experimental.....	25
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
8.1.	Humedad inicial de la cáscara de sandía.....	26
8.2.	Cinética de secado de cáscaras de sandía.....	26
8.2.1.	Curvas de secado de cáscaras de sandía.....	26
8.2.2.	Curva de velocidad de secado de cáscara de sandía.....	28
8.3.	Curva de encogimiento.....	30
8.4.	Difusividad efectiva.....	31
8.5.	Modelado matemático de las curvas de secado.....	35
8.6.	Coeficiente de transferencia de calor.....	42
8.7.	Coeficiente de transferencia de masa.....	43
9.	CONCLUSIONES.....	45
10.	RECOMENDACIONES.....	46
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	47
12.	ANEXOS.....	53

LISTA DE TABLAS.

	PÁG.
Tabla 1. Clasificación taxonómica de la sandía	7
Tabla 2. Composición bromatológica aproximada de la corteza y pulpa de la sandía Citrullus lanatus	8
Tabla 3. Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado.....	13
Tabla 4. Difusividad efectiva de la cascara de sandía	32
Tabla 5. Parámetros empíricos y estadísticos de los modelos de Newton, Page y Henderson y Pabis para secado de corteza de sandía (Citrullus lanatus)	37
Tabla 6. Coeficientes de transferencia de calor	43
Tabla 7. Coeficientes de transferencia de masa.....	44

LISTA DE ECUACIONES.

	PÁG.
Ecuación 1. Humedad en base húmeda (x')	9
Ecuación 2. Humedad en base seca (X_t) _c	10
Ecuación 3. Humedad en base seca (X_t)	10
Ecuación 4. Valor del contenido de humedad libre	11
Ecuación 5. Velocidad R	11
Ecuación 6. Porcentaje de humedad	18
Ecuación 7. Derivada del contenido de humedad con respecto al tiempo.....	19
Ecuación 8. Tasa de secado	19
Ecuación 9. Segunda ecuación de difusión de Fick.....	20
Ecuación 10. Forma logarítmica Segunda ecuación de difusión de Fick	21
Ecuación 11. Pendiente de recta de grafica ln (MR)	21
Ecuación 12. Modelo de Henderson y Pabis	22
Ecuación 13. Modelo de Newton (Lewis)	22
Ecuación 14. Modelo de Page	22
Ecuación 15. Suma cuadrado del error experimental	22
Ecuación 16. Desviación media ponderada cuadrada.....	22
Ecuación 17. Cuadrado medio del error experimental	23
Ecuación 18. Coeficiente de transferencia de masa (h_m).....	23
Ecuación 19. Número de Reynolds (Re)	24
Ecuación 20. Número de Prandtl	24
Ecuación 21. Factor de Colburn	24
Ecuación 22. Número de Schmidt	25
Ecuación 23. Viscosidad cinemática	25

LISTA DE FIGURAS.

	PÁG.
Figura 1. Secador de bandejas o anaqueles	9
Figura 2. Gráfico de los datos de humedad libre en función del tiempo.....	11
Figura 3. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre.....	12
Figura 4. Curvas de secado de cascara de sandía (Citrullus lanatus).	27
Figura 5. Curvas de velocidad de secado de cascara de sandía (Citrullus lanatus)	28
Figura 6. Curvas de velocidad de secado de cascara de sandía (Citrullus lanatus).....	28
Figura 7. Curva de encogimiento cascara de sandía (Citrullus lanatus).....	30
Figura 8. Curva de encogimiento cascara de sandía (Citrullus lanatus).....	31
Figura 9. Superficie de respuesta de la variable difusividad efectiva.	32
Figura 10. Diagrama de pareto estandarizada para difusividad efectiva.	32

1. INTRODUCCIÓN

La sandía (*Citrullus lanatus*), es una cucurbitácea procedente de África Tropical (Gómez, 1991) cuyos frutos son esféricos y contienen alojadas en su interior la pulpa y las semillas (J. Quintero, 1981). En la actualidad la parte de esta fruta que mayor interés está despertando es la corteza por su alto contenido de proteínas y la elevada presencia de un aminoácido conocido como citrulina (Fila et al., 2013), por lo que múltiples investigaciones están realizando estudios para utilizar la cáscara de sandía (que de momento es mayoritariamente desechada) en distintos productos alimentarios.

Antes de procesar la cáscara de sandía es necesario someterla a un proceso de secado debido a que posee una humedad aproximada de 67.5 % (Fila et al., 2013). Actualmente son escasos los estudios que se han llevado a cabo acerca de la cinética de secado de la cáscara de sandía, lo cual no solo influye en la calidad de esta materia prima luego de ser sometida a dicha operación, sino que también, incrementa los costos del proceso. Por tal razón, el objetivo de esta investigación fue determinar los parámetros de transferencia de masa y calor durante el secado convectivo de cáscara de sandía, debido a que estos permitirán estandarizar este procedimiento mediante el mejoramiento de la relación temperatura-tiempo de secado, con lo cual se incrementa el rendimiento, se disminuyen los costos y se conservan las características de calidad (Kumar et al., 2014).

En este trabajo, se obtuvo la curva de secado a diferentes condiciones de velocidad del aire (2,3 y 4 m/s) y temperatura (40, 50 y 60 °C), se resolvió el balance de materia aplicando la solución analítica de la Ley de Fick y posteriormente los datos obtenidos se ajustaron a los modelos matemáticos de Henderson y Pabis, Newton y Pages siendo este último el que mejor ajuste presentó. Asimismo, se obtuvieron valores en un rango de $7,58 \times 10^{-10}$ a $1,90 \times 10^{-9}$ m²/s para la difusividad efectiva, de $3,761 \times 10^{-7}$ a $1,289 \times 10^{-6}$ m/s para el coeficiente de transferencia de masa y de 12,03 a 21,70 w/m² K para el coeficiente de transferencia de calor. De igual forma, después de realizarse el análisis ANOVA se estableció que la mejor condición de operación, de todas las que se estudiaron, fue 60 °C de temperatura y 4 m/s de velocidad del aire dado que permite obtener la difusividad efectiva más alta ($1,90 \times 10^{-9}$ m²/s).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen escasos estudios acerca de la cinética de secado de la cáscara de sandía, hecho que conlleva a que los actuales métodos utilizados en esta operación resulten agresivos. Esta agresividad se refleja en el deterioro de las características fisicoquímicas de algunos compuestos presentes en el material, un mayor consumo energético y la disminución del rendimiento.

Actualmente no se conocen los parámetros de transferencia de masa y calor durante el proceso de secado de cáscara de sandía los cuales son necesarios para conocer la incidencia de la relación temperatura-tiempo durante dicha operación; según lo evidenciado por (Portela et al, 2015) que en su estudio ponen de manifiesto ciertas limitaciones acarreadas por la falta de conocimiento de las temperaturas óptimas aplicadas al secado convectivo de cáscara de sandía para la elaboración de harina.

En la mayoría de los métodos actualmente utilizados en el secado de cáscara de sandía se emplean temperaturas muy altas (superiores a 100 °C) durante periodos largos de tiempo (más de 24 horas) (Sánchez et al, 2015), lo que conlleva a un incremento en los costos ligados a la operación de secado, esto se traduce en un aumento en el valor comercial del producto final, en este caso la harina obtenida, disminuyendo las posibilidades de éxito a la hora de competir en el mercado con otros productos.

Analizando todo lo anterior surge la siguiente pregunta: ¿será posible determinar los parámetros de transferencia de masa y calor durante el secado convectivo de cáscara de sandía?

3. JUSTIFICACIÓN

El conocimiento de los parámetros de transferencia de masa y calor durante el secado de la cáscara de sandía es un factor de gran trascendencia a la hora de mejorar las tecnologías empleadas en el proceso de secado, debido a que permiten ilustrar la manera en que fluyen y se distribuyen la humedad y el calor durante la operación.

La importancia del estudio y desarrollo de esta investigación radica en que permitirá estandarizar adecuadamente el proceso de secado de la cáscara de sandía. Los parámetros que se lograron establecer son el coeficiente de transferencia de masa, la difusividad efectiva de humedad y el coeficiente de transferencia de calor (Virgen et al., 2016), con lo cual se aportaron nuevos datos, dado que la literatura no reporta los parámetros antes mencionados, para el secado de cáscara de sandía.

Desde el punto de vista económico, la importancia de este estudio se basa en la adecuada estandarización del proceso de secado, lo cual contribuye a disminuir el consumo energético e incrementar el rendimiento durante dicha operación (Kumar et al., 2014), cuyas consecuencias inmediatas son la reducción de los costos y un aumento en el potencial comercial de los productos que puedan ser extraídos de la cáscara de sandía y que están siendo evaluados en las distintas investigaciones llevadas a cabo por diversos investigadores en diferentes latitudes.

Lo anterior se logra mediante la estandarización de la relación que existe entre la temperatura y el tiempo empleado en el secado, (Urfalino & Worlock, 2014) debido a que una adecuada relación temperatura-tiempo incide en el ahorro energético durante el secado y en el mejoramiento de ciertas características de calidad del producto.

Además esta investigación brinda herramientas a otras investigaciones que se están ejecutando en el grupo de investigación optimización agroindustrial (GOA), del programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Popular del Cesar, aportando nueva información en la línea de investigación de aprovechamiento de la biomasa disponible y resultados podrán ser reportados en un artículo científico de una revista nacional.

4. ANTECEDENTES

Se ha estudiado el proceso de secado de una gran cantidad de materias primas. En frutos secos (Moreira et al, 2005) construyeron un modelo matemático de la cinética de secado de frutos de castaña (*Castanea sativa mill.*), mediante un circuito de aire cerrado asistido por una bomba de calor a temperatura (45-65 °C), humedad relativa (20-40%) y velocidad del aire (1.8-2.7 m/s) midiendo periódicamente el peso, tamaño y color con el fin de construir la cinética correspondiente para cada variable. Continuando con esta fruta (Delgado et al., 2014) estudiaron dos variedades procedentes de Europa incluyendo otras variables tales como la variación del color y la contracción volumétrica durante el proceso, utilizando un horno de convección de aire caliente a $50,0 \pm 2,0$ °C y una velocidad del aire de $1,0 \pm 0,1$ m/s. Los frutos se secaron con y sin cáscara, determinándose las dimensiones axiales, el encogimiento volumétrico y el color.

El secado de café ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones como la realizada por (Sfredo et al., 2005) en la cual se estudió la transferencia de masa y calor durante el secado de granos de café en bandejas vibradas y en un secador de lecho fijo. Las variables manejadas fueron amplitud y la frecuencia de vibración $A_x = 0.211 \cdot 10^{-3}$, $A_y = 0.945 \cdot 10^{-3}$ m y 60Hz. De igual manera (Hernandez et al., 2008) propusieron un modelo de transferencia de calor y masa en un sistema de coordenadas esféricas para describir el secado de granos de café verdes. La difusividad efectiva media del agua en función de la temperatura y la humedad se estimó a 45 y 60 °C por el método de la pendiente de la cinética de secado experimental. Así mismo, (Reyes et al., 2016) determinaron la efectividad de la implementación de técnicas combinadas (microondas-lecho fluidizado) para mejorar el tiempo del secado obteniendo mejoras significativas en la calidad organoléptica.

En el mismo sentido, en el área de cereales (Torrez et al., 2017) estudiaron la cinética de la transferencia de masa y energía durante el secado y secado en lecho fluidizado de quínoa empapada y lavada. Se obtuvieron curvas que describen el contenido de humedad y el comportamiento de la temperatura con el tiempo para temperaturas de 80, 100, 120 y 140 °C y velocidad del aire de 0,8 m/s. Se propuso un modelo de masa y energía acoplado para describir matemáticamente las curvas. El modelo consistió en un par de ecuaciones

diferenciales ordinarias (ODEs): una ecuación de equilibrio de energía macroscópica transitorio para la transferencia de calor y una ecuación de transferencia de masa temporal de dimensión corta o larga. El modelo se utilizó para determinar el coeficiente de difusión efectivo propuesto como una función de Arrhenius de la temperatura mediante la utilización de todo el conjunto de datos.

En tubérculos y hortalizas, (Białobrzewski, 2007) determinó el coeficiente de transferencia de masa durante el secado con aire caliente de la raíz de apio en condiciones de convección natural. El enfoque de la formulación del problema inverso se aplicó para la determinación simultánea del coeficiente de transferencia de masa y la difusividad efectiva de la humedad. (Yildiz et al., 2007) determinaron los parámetros efectivos de calor (coeficiente de transferencia de calor) y transferencia de masa (coeficiente de transferencia de masa y difusividad de humedad) durante la fritura de rodajas de patata (8.5 x 8.5 x 70 mm) en aceite de girasol a 150, 170 y 190 °C. (Górnicki y Kaleta, 2007) estudiaron el secado de zanahorias y obtuvieron la curva de secado de cubos de zanahoria escaldados. (Ndukwu et al., 2017) investigaron algunos parámetros de transferencia de calor y masa (HMTPs) de tres variedades de rodajas de malanga y su nivel de retención de vitamina B en el secado convectivo. Las variedades utilizadas fueron *Colocasia esculenta* (COE) y *Xanthosoma sagittifolium* (carne blanca - NX01, carne roja - NX02). Se emplearon procedimientos de secado al horno, donde las temperaturas se mantuvieron entre 50 y 70 °C (secado en horno) y secado al sol, las lecturas se observaron cada hora.

La mayor cantidad de investigaciones realizadas sobre cinética de secado en alimentos de origen vegetal se centran en el área de las frutas como kiwi (Kaya et al., 2008), peras y manzanas (Agnelli et al., 2005), uvas empacadas (Acevedo et al, 2007), pitaya roja (Haj Najafi et al., 2014), membrillo (Tzempelikos et al., 2015), papaya (Lemus et al., 2013), frutas tropicales (Karim y Hawlader, 2005), puré de frutas (Jaturonglumlert y Kiatsiriroat, 2010), entre otros.

De igual forma el secado de la pulpa de sandía ha sido estudiado en diferentes trabajos como los hechos por (Falade et al., 2007) que investigaron la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de la sandía y los cambios de color. La transferencia de masa durante la deshidratación osmótica se modeló utilizando la segunda ley de difusión de Fick.

(Oberoi y Sogi, 2015) estudiaron la retención de licopeno en la pulpa de sandía durante la deshidratación en un secador de lecho fluidizado a temperaturas de 50-70 °C usando cargas de bandeja de 2-6 kg / m².

Por último, (Portela et al., 2015) evaluaron el proceso de secado por convección de la corteza de la sandía y la obtención de una harina con aplicación en la nutrición humana. La materia prima se cortó longitudinalmente (5 mm de espesor), preservando el epicarpio y retirando el mesocarpio y fue sometida a secado por convección en diferentes condiciones de temperatura del aire (40-60 °C) y una velocidad fija del aire (1.0 m/s). Se llevó a cabo el estudio de la cinética de secado y el ajuste a los modelos matemáticos (Fick, Page y de dos parámetros empíricos).

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Sandía.

La sandía (*Citrullus lanatus*), es procedente de África tropical (más específicamente de las regiones semidesérticas de dicho continente) y luego de ser introducida a Irán, la India y el Lejano Oriente fue llevada a Europa donde posteriormente se extendió por diferentes partes del mundo. (Gómez, 1991), (Santos et al., 2009).

La planta de dicha fruta es de tallos rastreros, herbáceos, pubescentes y largos, terminados en zarcillos que le permiten trepar. Las hojas son grandes, de forma ovalada, pecioladas y en disposición alterna. Sus flores son unisexuales, encontrándose de ambos géneros, masculino y femenino, en la misma planta. Las flores femeninas tienen ovario ínfero y dan lugar a frutos más o menos voluminosos, esféricos o alargados y lisos. La pulpa de los frutos es carnosa, azucarada y de color rosa y amarilla. Las semillas, alojadas en el interior de la pulpa, son aplastadas, de forma oval y color que va del blanquecino marrón, al negro intenso, siendo, en ocasiones, moteadas. (Quintero, 1981). La clasificación taxonómica de esta fruta se muestra en la tabla No. 1.

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la sandía. Fuente: (CORPOICA, 2000)

Clasificación taxonómica	
Reino	Vegetal
División	Espermatophyta
Clase	Dicotiledoneae
Orden	Cucurbitales
Familia	Cucurbitaceae
Género	Citrullus
Especie	Citrullus lanatus
Nombres Comunes	Sandía, Patilla, Melón de agua

Esta fruta presenta un gran número de variedades (Charleston Gray, Sugar Baby, entre otros) e híbridos (Prince Charles, Royal Charleston, Royal Sweet) dentro de los cuales de se

presenta gran variación en el tamaño, la forma y la coloración interna y externa (CORPOICA, 2000). El fruto de dicha planta es una baya grande con placenta carnosa y epicarpio quebradizo generalmente liso, cuyo peso promedio es mayor a 4 kilos (en algunos casos menor como la variedad Sugar Baby) alcanzando hasta los 10 a 12 kilos como es el caso de la variedad Charleston Gray.

Al interior del fruto se hallan un gran número de semillas alojadas de forma no uniforme alrededor de la pulpa, de igual forma existen variedades las cuales no poseen semillas, como es el caso de algunas sandías triploides, las cuales requieren ser polinizadas por otros tipos de sandía. (Nichols, 1998). Cabe destacar que dicha fruta posee gran cantidad de nutrientes tales como: grasas, fibra, carbohidratos, proteínas, minerales, entre otros, los cuales se encuentran depositados a lo largo de su pulpa, semilla y corteza.

Tabla 2. Composición bromatológica aproximada de la corteza y pulpa de la sandía *Citrullus lanatus*. Fuente: (Fila, et al., 2013).

	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteína (%)	Fibra (%)	Grasa (%)	CHO (%)
FWMP	91,82 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,44 ± 0,05	0,19 ± 0,01	0,15 ± 0,01	7,19 ± 0,05
FWMR	67,5 ± 0,64	0,41 ± 0,02	2,51 ± 0,06	0,30 ± 0,01	0,15 ± 0,01	29,65 ± 0,58
DWMP	5,34 ± 0,01	2,43 ± 0,01	0,83 ± 0,02	1,25 ± 0,02	0,38 ± 0,01	89,77 ± 0,03
DWMR	5,08 ± 0,02	3,07 ± 0,02	7,11 ± 0,00	2,91 ± 0,01	0,21 ± 0,01	81,62 ± 0,05

FWMP: base húmeda de la pulpa, **FWMR:** base húmeda de la corteza, **DWMP:** base seca de la pulpa, **DWMR:** base seca de la corteza, **CHO:** carbohidratos.

5.2. Secado.

El término secado se refiere a la acción de retirar la humedad de un material. Su aplicación puede ser tan amplia que es necesario delimitar este concepto a ciertos procesos de ingeniería. Por ejemplo, es posible secar un sólido por evaporación de la humedad mediante el uso de una corriente de gas para arrastrar el vapor, pero dentro de la definición de secado no se enmarca la extracción de humedad a través de medios mecánicos como el centrifugado o el exprimido (Treybal, 2013). Igualmente cabe resaltar que en la mayoría de los procesos de secado la humedad la constituye el agua y el gas utilizado en el arrastre del vapor es aire, de tal manera que esta mezcla sirve de fundamento para el análisis de esta operación.

Son diversas las técnicas utilizadas en los procesos de secado convectivo en las cuales se emplea aire caliente. Entre las técnicas mayormente utilizadas podemos encontrar el secado de gabinete o compartimientos, bandejas o anaquel, en el cual el material se ubica de forma uniforme sobre el anaquel metálico con una profundidad de 10 a 100 mm, las cuales se cargan y se descargan de un compartimiento. El sistema consta de un ventilador el cual recircula aire caliente y vapor. Aproximadamente de 10 a 20% de dicha mezcla es esparcida sobre el o los anaqueles metálicos, el resto es aire nuevo.

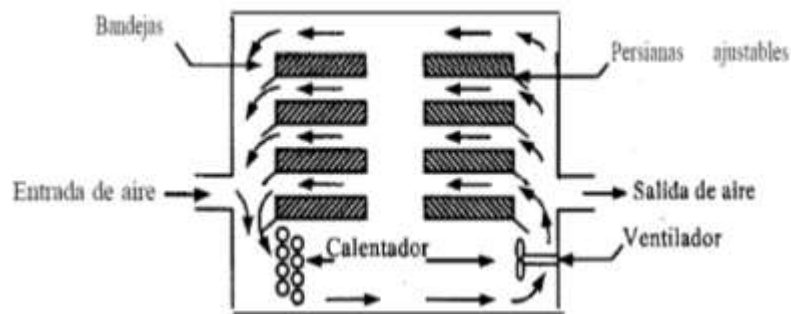


Figura 1. Secador de bandejas o anaqueles (Treybal, 2013) .

5.3. Humedad

La humedad se define como el contenido de líquido (generalmente agua) de un material sólido (Geankoplis, 1998). La humedad puede expresarse de 2 formas distintas:

5.3.1. Humedad en base húmeda (x'): es la relación que hay entre la cantidad de agua del material y la cantidad de material húmedo.

$$x' = \frac{W - W_s}{W} = \frac{Kg \text{ totales de agua}}{Kg \text{ sólido húmedo}}$$

Ecuación 1.

Donde:

W= masa del sólido húmedo.

W_s= masa del sólido seco.

5.3.2. Humedad en base seca (Xt): es la relación que hay entre la cantidad de agua del material y la cantidad de material seco.

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} = \frac{K_{g \text{ totales de agua}}}{K_{g \text{ sólido seco}}}$$

Ecuación 2.

5.3.3. Relación entre base húmeda y base seca

$$X_t = \frac{x'}{1-x'}$$

Ecuación 3.

5.4. Contenido de humedad de equilibrio de los materiales

Si un sólido se expone a una corriente gaseosa con una presión parcial de vapor (P_g), el sólido perderá o ganará humedad hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido (P_v) iguale a la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa, entonces se dice que el sólido y el gas se encuentran en EQUILIBRIO (Castillo, 2011).

5.5. Curvas de secado

Son gráficas que muestran el comportamiento de la humedad de un material a través del tiempo durante el proceso de secado. Estas graficas se construyen a partir de datos obtenidos experimentalmente (Geankoplis, 1998).

El procedimiento para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material consiste en colocar una muestra en una bandeja. Se calcula la pérdida en peso de humedad durante el secado en diferentes intervalos sin interrumpir la operación, mediante una balanza adaptada al secador. La velocidad, la humedad, la temperatura y la dirección del aire deben ser las mismas y constantes para garantizar un secado en condiciones constantes.

Los resultados que se obtienen se expresan como peso total W del sólido húmedo a intervalos de tiempo regulares durante el proceso de secado. Luego se determina la humedad absoluta del material utilizando la ecuación 2. Se determina el contenido de humedad de equilibrio, X^* (Kg. De humedad de equilibrio / Kg. De sólido seco) y se procede a calcular el valor del contenido de humedad libre X (en Kg. De agua libre / Kg. De sólido seco para cada valor de X_t) con la ecuación 4:

$$X = X_t - X^*$$

Ecuación 4.

Se traza una gráfica del contenido de humedad libre X en función del tiempo t en horas (h), como se muestra en la figura 2. Para obtener una curva de velocidad de secado, se miden las pendientes de las tangentes a la curva, lo cual proporciona valores de dx/dt para ciertos valores de t . Se calcula entonces la velocidad R para cada punto con la ecuación 5:

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt}$$

Ecuación 5.

Dónde:

R = velocidad de secado en Kg. H₂O/h. m².

L_s = Kg. De sólido seco usado.

A = área superficial expuesta al secado en m².

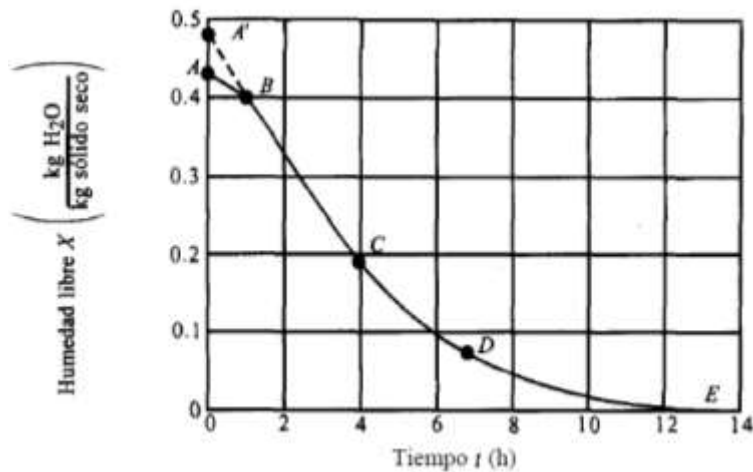


Figura 2. Gráfico de los datos de humedad libre en función del tiempo (Treybal, 2013).

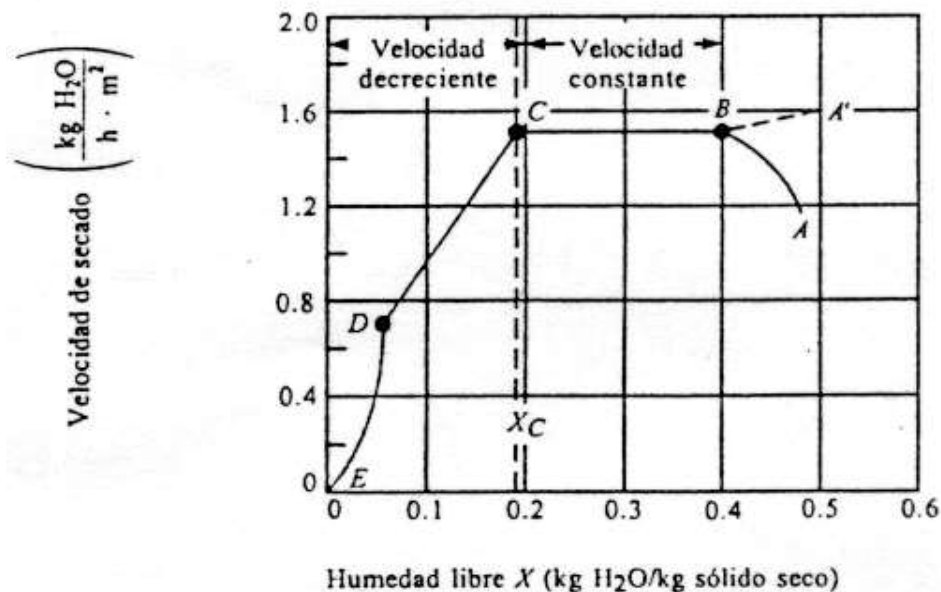


Figura 3. Curva de velocidad de secado en función del contenido de humedad libre (Treybal, 2013).

En el caso de secado constante, como se muestra en la figura 3, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Inicialmente el sólido presenta una temperatura inferior a la final, y la velocidad de evaporación va en aumento. En el punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Si el sólido posee una temperatura alta al inicio de la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'.

La curva de la figura 2 es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo, que es equivalente a la línea BC en la figura 3. La velocidad de secado empieza a disminuir desde el punto C en ambas gráficas hasta llegar al punto D, en el cual la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio es P, y $X = X_y - X_y = 0$.

5.6. Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado.

Los modelos matemáticos son herramientas utilizadas para estimar el tiempo necesario para reducir la humedad de agua del producto en diferentes condiciones de secado mejorando la eficiencia del proceso (Andrade et al., 2003).

Tabla 3. Modelos matemáticos para describir el comportamiento cinético de secado.

Nombre	Ecuación
Newton	$MR = \text{Exp}(-kt)$
Page	$MR = \text{Exp}(-kt^n)$
Page Modificado	$MR = \text{Exp}[-(kt)^n]$
Henderson y Pabis	$MR = a[\text{Exp}(-kt)]$
Logarítmico	$MR = a[\text{Exp}(-kt)] + c$
Thomson	$MR = 1 + at + bt^2 \quad t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2$
Difusión	$MR = a[\text{Exp}(-kt)] + (1-a)[\text{Exp}(-kbt)]$

Fuente: (Ertekin, C., Yaldiz, 2004).

En este caso MR es la razón de humedad, t es el tiempo de secado en horas, K, K₀, K₁ son las constantes de secado (h-1), a, b, c, n los coeficientes de ajuste.

Modelo de Newton

Este modelo es también conocido como modelo de Lewis o exponencial. Se dice que este es el modelo más sencillo debido a que es un modelo simple de dos constantes. Este modelo ha sido utilizado en la descripción del comportamiento de una gran variedad de alimentos y productos agrícolas (Onwude, et al., 2016). Dentro de su ecuación podemos encontrar ciertas variables y contantes (K es la contante de secado y se expresa en (s⁻¹), MR es la relación de contenido de humedad, a es el coeficiente de secado y t es el o los tiempos de secado).

Modelo de Page

El modelo de Page o modelo de Lewis modificado como también se conoce es una modificación empírica al modelo de Newton, en este caso los errores asociados respecto al valor obtenido en el modelo de Lewis se ven sublevados gracias a la adición de una constante empírica adimensional (n), este modelo es el modelo semi-teórico más utilizado. Este modelo se encuentra entre los más apropiados al momento de describir el comportamiento de ciertas frutas y vegetales (banana, frijol, mango, cebolla, entre otros). (Onwude et al., 2016).

Modelo de Henderson y Pabis

Este modelo se contempla como el primer término obtenido de la solución general de la segunda ley de Fick de difusión. Este modelo puede ser acoplado como un modelo simple de solo dos constantes. Este modelo ha sido ampliamente utilizado en el secado de granos tales como el maíz. Sin embargo no presenta mucha eficiencia respecto al secado de frutas y vegetales.(Onwude et al., 2016).

5.7. Parámetros de transferencia de masa

5.7.1. Coeficiente de transferencia de masa.

El coeficiente de transferencia de masa (K) se define como una velocidad determinada de transferencia de masa por unidad de área y por unidad de diferencia de concentración, el cual generalmente se expresa en flujos molales iguales.(McCabe et al., 2007).

5.7.2. Difusividad efectiva.

La difusividad efectiva de la humedad describe todos los mecanismos posibles de movimiento de humedad dentro del alimento, tales como difusión líquida, difusión de vapor, difusión superficial, flujo capilar y flujo hidrodinámico. Un conocimiento de la difusividad efectiva de la humedad es necesario para diseñar y modelar procesos de transferencia de masa tales como deshidratación, adsorción y desorción de la humedad durante el almacenamiento (Akoy, 2014).

La difusividad efectiva es el parámetro de mayor relevancia en cuanto al análisis, diseño y optimización de la transferencia de calor y de masa durante el proceso de secado. En general, se utilizan dos tipos de difusividades efectivas para desarrollar el modelado matemático del secado de los alimentos, a saber, la difusividad efectiva dependiente de la humedad y la difusividad efectiva dependiente de la temperatura. Sin embargo, ningún estudio ha investigado extensamente qué difusividad efectiva es más precisa en la predicción de la cinética de secado. (Khan et al., 2016).

5.8. Parámetros de transferencia de calor

5.8.1. Coeficiente de transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor es una característica cuantitativa de la transferencia de calor convectivo entre un medio fluido (un fluido) y la superficie (pared) fluida por el

fluido. Esta característica aparece como un factor de proporcionalidad a en la relación de Newton-Richmann. Cabe destacar que este parámetro no hace parte de las propiedades del alimento, pero son de vital importancia al momento de diseñar o controlar el procesamiento de los alimentos cuando estos están sometidos a calentamiento, enfriamiento u otro proceso de carácter térmico considerando el estado cuasi-estacionario cuando la temperatura en el interior del sólido es uniforme (Rahman, 1995).

El coeficiente de transferencia de calor depende de las condiciones de flujo y las propiedades del fluido. El paso más importante en los cálculos de convección por calor es la determinación del coeficiente de transferencia de calor apropiado. Cuanto mayor sea la velocidad del fluido, mayor será el coeficiente de transferencia de calor. Se han desarrollado numerosas correlaciones para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en términos de grupos adimensionales (Calhoun & Golmanavich, 2012).

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Determinar los parámetros de transferencia de masa y calor durante el secado de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*).

6.2. Objetivos específicos

- Estudiar la cinética de secado de la cáscara de sandía mediante la construcción de la curva de secado y la curva de velocidad de secado.
- Modelar la transferencia de masa del proceso de secado de cáscara de sandía a través de los modelos matemáticos de Henderson y Pabis, Newton y Page.
- Establecer el valor de la difusividad efectiva y los coeficientes de transferencia de masa y calor utilizando las respectivas ecuaciones de cinética de secado aplicables a geometría de lámina (placa plana).

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Tipo y enfoque de la investigación

La investigación es de tipo experimental con un enfoque cuantitativo donde se analizarán los datos obtenidos de las variables de respuesta mediante herramientas estadísticas para la posterior interpretación de los datos.

7.2. Recolección de la información

Para la realización de este proyecto se tendrá en cuenta dos fuentes de información:

7.2.1. Fuentes primarias.

Para la información primaria se efectuó la toma de muestras de frutos de sandía (*Citrullus lanatus*), comercializadas en cinco puntos de distribución minorista de la ciudad de Valledupar, para extraer la corteza la cual posteriormente será sometida al proceso de secado.

7.2.2. Fuentes secundarias.

La información secundaria está compuesta de datos bibliográficos relevantes al tema de investigación, que se localizarán en tesis, entrevistas, conferencias, trabajos de investigación, artículos científicos, libros, internet, etc.

7.3. Población.

La población con la que se realizó el estudio fueron las sandías (*Citrullus lanatus*) comercializadas en los puntos minoristas de la ciudad de Valledupar.

7.4. Procedimiento

7.4.1. Obtención y adecuación de la materia prima

Se tomaron 10 Kg de muestra de sandía híbrida Santa Amelia (variedad Royal Sweet), como se estipula en la NTC 756. La recolección de muestras se llevó a cabo en cinco puntos de distribución minoristas de ubicados en distintas zonas de la ciudad de Valledupar (norte, sur, este, oeste y centro) identificados por (Durán et al., 2017) rechazando las muestras que

presenten lesiones físicas. Las muestras fueron empacadas en bolsas de polietileno asegurando su conservación para trasportarlas al laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Antioquia en la ciudad de Medellín- Colombia.

Para la extracción de la pulpa las muestras fueron cortadas con chuchillo de acero inoxidable longitudinalmente realizando dos cortes con el fin de obtener 4 trozos uniformes para posteriormente retirar la pulpa, obteniendo la corteza de la fruta.

Las muestras de corteza de sandía fueron cortadas en láminas de 2 cm de largo por 2 cm de ancho con un espesor de 5 mm manteniendo el epicarpio y el mesocarpio, midiéndose este espesor y estandarizándolo con la ayuda de un calibrador Vernier.

7.4.2. Determinación de la humedad inicial.

La determinación de la humedad inicial se realizó por triplicado mediante el método de pérdida de masa en un horno Binder Modelo ED 115 a una temperatura promedio de 105 ± 2 °C hasta obtener un peso constante en las muestras (Máxima variación de 0,05 g). Se determinó el peso de las muestras antes, durante y después de llevarlas al horno en una balanza analítica A&D HR-250^a (precisión 0.0003 g) (Garcia, S et al., 2007). Luego de obtener el peso de la muestra inicial y seca se calculó la humedad con la ecuación 6:

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{\text{Masa de la muestra húmeda} - \text{masa de la muestra seca}}{\text{masa de la muestra húmeda}} \times 100$$

Ecuación 6.

7.4.3. Construcción de la curva de secado

Los ensayos se llevaron a cabo por duplicado a tres temperaturas diferentes (40, 50 y 60 ° C) con una velocidad de aire (2, 3 y 4 m/s) en un túnel de secado, el cual consiste en un sistema en flujo de aire a través de bandejas. Se midió la temperatura de bulbo seco y la humedad del aire de secado con un sensor integrado al equipo y la velocidad del aire de secado con un anemómetro. Dentro de cada bandeja se depositó una cantidad de $55,00 \pm 1$ g de material, previamente pesado sobre una balanza analítica A&D HR-250^a (precisión 0.0003 g).

El contenido de humedad de las muestras, durante el proceso de secado al aire, se determinó gravimétricamente a partir del contenido de humedad inicial de las muestras (antes del

proceso de secado al aire). Se utilizó intervalos de ponderación de 15 minutos durante la primera hora de procesamiento, 30 minutos durante las 2 horas siguientes y luego 1 hora hasta alcanzar el equilibrio dinámico entre el contenido de humedad de la muestra y la humedad del aire de secado cuando el peso de la muestra se mantuvo constante (variación máxima 0.05 g) (Portela et al., 2015).

Posteriormente se procedió a determinar los valores de humedad en función del tiempo (t) como el fin de construir las curvas de humedad del proceso (Ecuación 6) y de igual forma las curvas de velocidad de secado (dx/dt), determinándose mediante la derivada del contenido de humedad con respecto al tiempo. (Ecuación 7).

$$MR = \frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e}$$

Ecuación 7.

Donde:

MR = relación de contenido de humedad, este valor es adimensional.

X (t) = contenido de humedad del material a un tiempo de secado t (Kg de H₂O / Kg S.S).

X_o = contenido de humedad del material al inicio del proceso (Kg de H₂O / Kg S.S).

X_e = contenido de humedad del material en el momento del equilibrio dinámico (Kg de H₂O / Kg S.S).

$$\text{Velocidad de secado} = \frac{dx}{dt} = \frac{X(n-1) - X_n}{t(n-1) - tn}$$

Ecuación 8.

Donde:

dx / dt = velocidad de secado (Kg H₂O / Kg S.S. Min)

T = tiempo (minutos).

N = número de lecturas.

X_n y X_{n-1} = humedad (Kg de H₂O / Kg S.S) en el tiempo “n” y tiempo “n-1”.

7.4.4. Construcción de la curva de encogimiento

Se determinó el encogimiento de la corteza de sandía (*Citrullus lanatus*), a una condición experimental intermedia (temperatura de 50 °C y velocidad del aire de 3 m/s). Se sometieron al secado 5 láminas de corteza de sandía con un espesor de 5 mm, midiéndose el espesor con un calibre Vernier y pesando la muestra en una balanza analítica A&D HR-250^a (precisión 0.0003 g) cada 15 minutos hasta alcanzar el equilibrio. Con los datos de peso se calculó la humedad en cada instante de tiempo, para posteriormente construir la gráfica de humedad Vs espesor. La curva fue ajustada mediante una regresión no lineal, determinando de esta manera la relación entre el espesor y la humedad (Tzempelikos et al., 2015).

7.4.5. Determinación de la difusividad efectiva

La segunda ecuación de difusión de Fick se utilizó para calcular la difusividad efectiva de humedad de las láminas de cáscara de sandía, realizando las siguientes consideraciones: el encogimiento del material durante el proceso de secado es despreciable, una difusividad constante de humedad, geometría de placa infinita y distribución uniforme de la humedad inicial (Akoy, 2014). Para este sistema, la solución analítica es la siguiente:

$$\frac{X(t)-X_e}{X_o-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]$$

Ecuación 9.

Dónde:

$(X(t) - X_e) / (X_o - X_e)$ = relación de humedad en base seca (adimensional);

$X(t)$ = contenido medio de humedad en el instante t (Kg de H₂O/ Kg MS);

X_e = contenido de humedad en equilibrio (Kg de H₂O en el equilibrio/ Kg MS);

X_o = el contenido de humedad inicial (Kg de H₂O/ Kg MS);

$8/\pi^2$ = factor de forma para placa plana

L = espesor de la muestra (m),

t = tiempo de secado (s).

Def = difusividad efectiva del agua (m²/s),

Para tiempos largos de secado, la ecuación 9 se puede simplificar como la ecuación 10 tomando el primer término de la solución en serie y expresado en una forma logarítmica (Doymaz, 2012):

$$\ln MR = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right)$$

Ecuación 10.

De esta forma, se determinó la difusividad de humedad efectiva trazando los datos experimentales en términos de ln (MR) frente al tiempo de secado (s).

Finalmente, con los valores de difusividad efectiva calculados para cada tratamiento se llevaron a cabo simulaciones en el software COMSOL Multiphysics versión 3.5 a, con un mallado de 60 elementos y teniendo en cuenta los respectivos valores de humedad inicial, humedad final y tiempo total de secado, con el fin de comparar la curva de secado experimental y la simulada comprobando el ajuste de la curva simulada a la experimental mediante el coeficiente de determinación R².

7.4.6. Modelado matemático.

En el modelado matemático se utilizaron tres modelos (Henderson y Pabis, Newton (Lewis) y Page), los cuales se usan ampliamente en el secado de la mayoría de los alimentos y materiales biológicos. Los mismos derivan generalmente de la simplificación de la solución general de la segunda ley de Fick (Akoy, 2014). El modelo de Henderson y Pabis se expresa con la siguiente ecuación:

$$MR = A \exp(-kt)$$

Ecuación 11.

Dónde:

MR = relación de contenido de humedad, este valor es adimensional.

A= coeficiente de secado

k = constante de secado.

T = el Tiempo (s) de secado.

El modelo de Newton (Lewis) es un caso especial del modelo de Henderson y Pabis, el cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$MR = \exp(-kt)$$

Ecuación 12.

El modelo de Page representa una modificación empírica del modelo de Newton (Lewis) agregándole una constante a (coeficiente de secado) y se expresa con la siguiente ecuación:

$$MR = \exp(-kt^A)$$

Ecuación 13.

7.4.7. Análisis estadístico.

Se utilizó el análisis de regresión no lineal mediante el software SYSTAT versión 12.0 para evaluar los parámetros empíricos de los modelos seleccionados. La eficiencia del ajuste de los tres modelos de secado utilizados a los datos experimentales se determinó utilizando tres parámetros estadísticos (Coeficiente de determinación (R^2), suma cuadrado del error experimental (SSE), y cuadrado medio del error experimental (RMSE) (Akoy, 2014). Estos parámetros se calcularon utilizando las siguientes ecuaciones:

$$SSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2$$

Ecuación 14.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}{N-n}$$

Ecuación 15.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pred,i})^2}$$

Ecuación 16.

Dónde:

$MR_{exp.}$ = Relación de humedad experimental.

$MR_{pred.}$ = Relación de humedad predicha.

N = Número de observaciones.

N = Número de constantes.

Los valores de R^2 más altos y los valores inferiores de SSE y RMSE demuestran bondad de ajuste (Hassan-Beygi, et al., 2009).

7.4.8. Determinación del coeficiente de transferencia de calor.

De acuerdo con (Treybal, 2013) cuando fluye un gas paralelo a una superficie como en la bandeja de un secador de túnel el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c) se encuentra asociado al número de Reynolds (Re), en este caso Re debe estar en el rango 2600-22000 (flujo turbulento generalmente) para la aplicación de las ecuaciones de determinación de coeficiente de transferencia de calor a partir de las condiciones de flujo.

El coeficiente de transferencia de calor se obtuvo despejándolo de la ecuación 17 (Bird, 2006), mediante el número de Nusselt como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Nu_{\text{calor}} = \frac{h_c L}{K}$$

Ecuación 17.

Donde:

h_c : coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 K$)

Nu: número de Nusselt (adimensional)

L: espesor (m)

K: conductividad térmica del aire ($w.m\ ^\circ C$)

El número de Nusselt se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Nu_{\text{calor}} = 0.036 Re^{4/5} Pr^{1/3}$$

Ecuación 18.

Donde:

Re: número de Reynolds (Adimensional)

Pr: número de Prandtl (Adimensional)

El número de Reynolds se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Ecuación 19.

Donde:

ρ : Densidad del aire (Kg/m³)

V: velocidad del aire (m/s)

L: espesor (m)

μ : Viscosidad del aire (Kg/m s)

El número de Prandtl se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

Ecuación 20.

Donde:

μ : Viscosidad del aire (Kg/m s)

C_p: calor específico del aire (KJ/Kg °C)

K: conductividad térmica del aire (W/m °C)

7.4.9. Determinación del coeficiente de transferencia de masa.

El coeficiente de transferencia de masa (h_m) se calculó mediante el factor de Colburn, el cual depende del régimen de circulación del fluido (Bird, 2006). Para flujo turbulento se establece la siguiente correlación:

$$Nu_{calor} Re^{-1} Pr^{-1/3} = Nu_{masa} Re^{-1} Sc^{-1/3}$$

Ecuación 21.

Donde:

Nu_{calor}: número de Nusselt de calor (adimensional)

Re: número de Reynolds (adimensional)

Pr: número de Prandtl (adimensional)

Nu_{materia}: número de Nusselt de materia (adimensional)

Sc: número de Schmidt (adimensional)

El número de Schmidt se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$Sc = \frac{\nu}{\varphi}$$

Ecuación 22.

Donde:

Sc: número de Schmidt (adimensional)

ν : Viscosidad cinemática (m²/s)

φ : Difusividad (m²/s)

De la ecuación 21 se despejó el número de Nusselt de masa (Nu_{masa}), para posteriormente calcular el coeficiente de transferencia de masa despejándolo de la siguiente ecuación:

$$Nu_{masa} = \frac{h_m L}{\varphi}$$

Ecuación 23.

Donde:

h_m : coeficiente de transferencia de masa (m/s)

L: espesor (m),

φ : Difusividad volumétrica (m²/s)

7.4.10. Diseño experimental.

En el proceso de secado convectivo de la cáscara de sandía se utilizó un diseño factorial 3² con nueve tratamientos, tres niveles y dos repeticiones. Los dos factores que representaron los tratamientos fueron: temperatura de secado y velocidad del aire. Los datos obtenidos de la variable de respuesta (difusividad efectiva) fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el software Statgraphics Centurión XVI.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Humedad inicial de la cáscara de sandía

El contenido de humedad de la corteza de sandía variedad Santa Amelia estudiada fue de $95.61 \pm 0.71\%$ b.h. Este valor de humedad es similar al reportado por (Durán et al., 2017) para corteza de sandía comercializadas en cinco puntos minoristas de la ciudad de Valledupar (95.7% b.h), así mismo se asemeja al valor obtenido por (Portela et al., 2015) para corteza de sandía variedad Santa Amelia cultivada en Brasil, que fue de 93.4% b.h, valor cercano al obtenido en nuestro estudio, debido a las similares condiciones climáticas bajo las cuales se cultiva esta variedad de sandía en Colombia y en Brasil. De igual manera, dista mucho del valor de humedad para la corteza de sandía variedad Santa Amelia cultivada en España, estudiada por (Fila et al., 2013) el cual fue de $67.5 \pm 0.64\%$ b.h, esto se debe a las condiciones del cultivo de sandía en España, en suelos áridos lo que provoca que los frutos tengan valores de humedad más bajos en su pulpa y en su corteza.

8.2. Cinética de secado de cáscaras de sandía.

8.2.1. Curvas de secado de cáscaras de sandía.

En la Figura 4 se muestran las curvas de secado de las cortezas de sandía a diferentes temperaturas ($40, 50$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) y velocidades del aire ($2, 3$ y 4 m/s). Se observa un comportamiento normal, en el cual la humedad de las muestras disminuye a través del tiempo, evidenciándose una pendiente alta al comienzo del proceso que se va suavizando a medida que transcurre el tiempo, hasta que al final se vuelve una recta casi horizontal. Esta misma tendencia se presenta en curvas de secado para materiales similares a la cáscara de sandía como membrillo (Tzempelikos et al., 2015), papaya (Lemus et al., 2013) y frutas tropicales (Karim y Hawlader, 2005). En el mismo sentido, se evidencia que los tiempos de secado para cáscara de sandía, en este estudio, oscilan entre 80 y 320 minutos, presentándose una marcada variación al cambiar las condiciones de temperatura y velocidad del aire de secado.

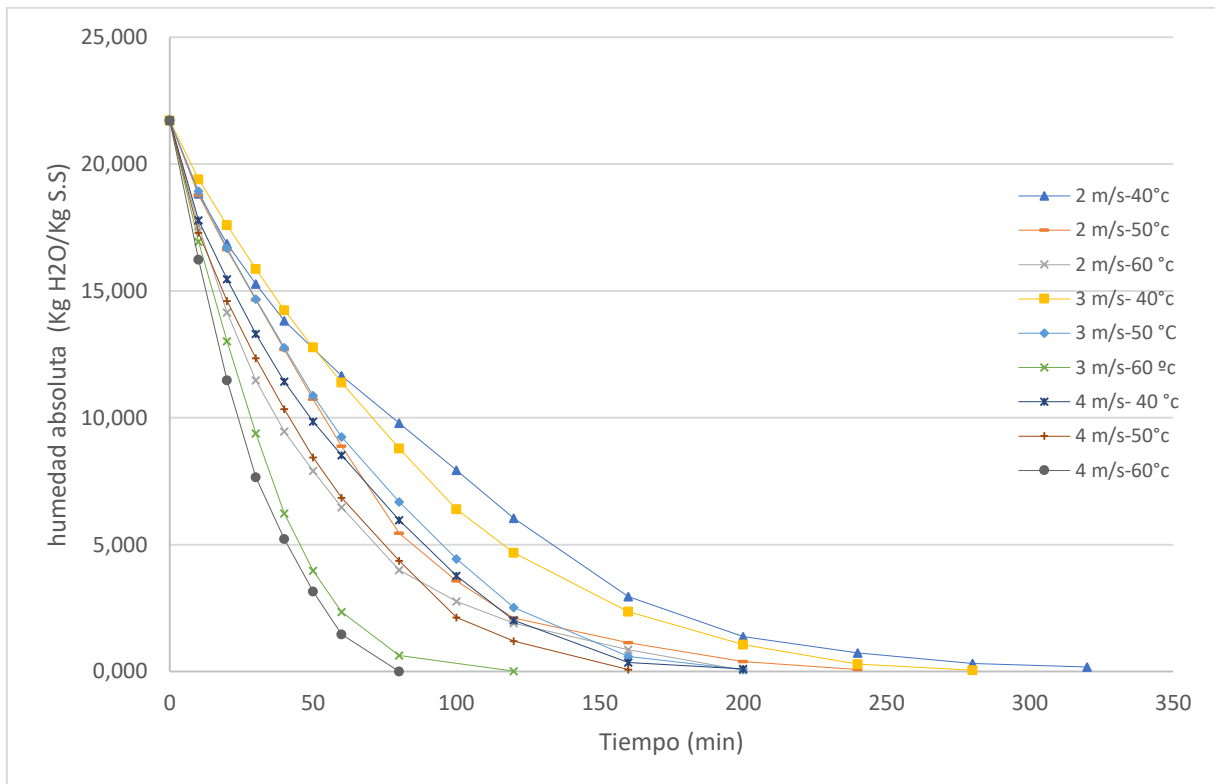


Figura 4. Curvas de secado de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)

De igual manera, es evidente como a medida que se incrementa la temperatura y la velocidad del aire la pendiente de la curva de secado aumenta, lo que indica que la velocidad de secado es mayor, disminuyéndose así el tiempo necesario para secar el material dado que al elevar la temperatura la capacidad de absorber agua del aire es mayor debido a que la humedad relativa del mismo es inversamente proporcional a la temperatura (Oberoi y Sogi, 2015), con lo cual el gradiente de humedad entre la muestra y la corriente de aire se hace mayor aumentando de esta manera la difusión (Ibarz y Barbosa, 2011). Todo esto concuerda con el comportamiento de las curvas de secado de tres variedades de yuca industrial a diferentes condiciones de temperatura (45,55 y 70 °C) y velocidad del aire (1, 2 y 3 m/s) obtenidas por (Torregroza et al., 2014), en las cuales se observa el incremento de la pendiente de las mismas al aumentar la temperatura y la velocidad del aire.

8.2.2. Curva de velocidad de secado de cáscara de sandía

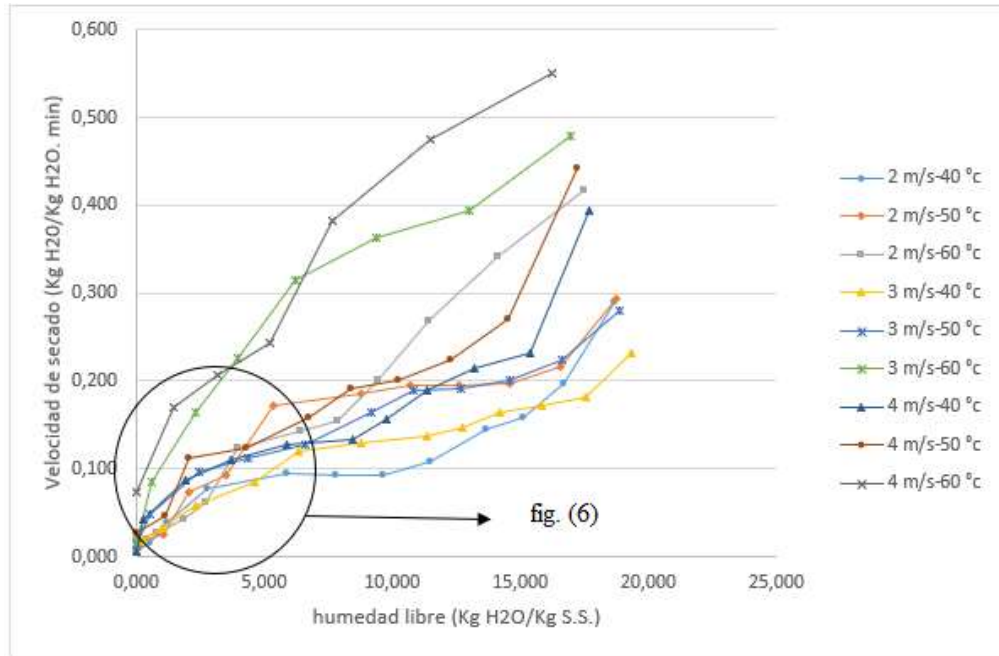


Figura 5. Curvas de velocidad de secado de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)

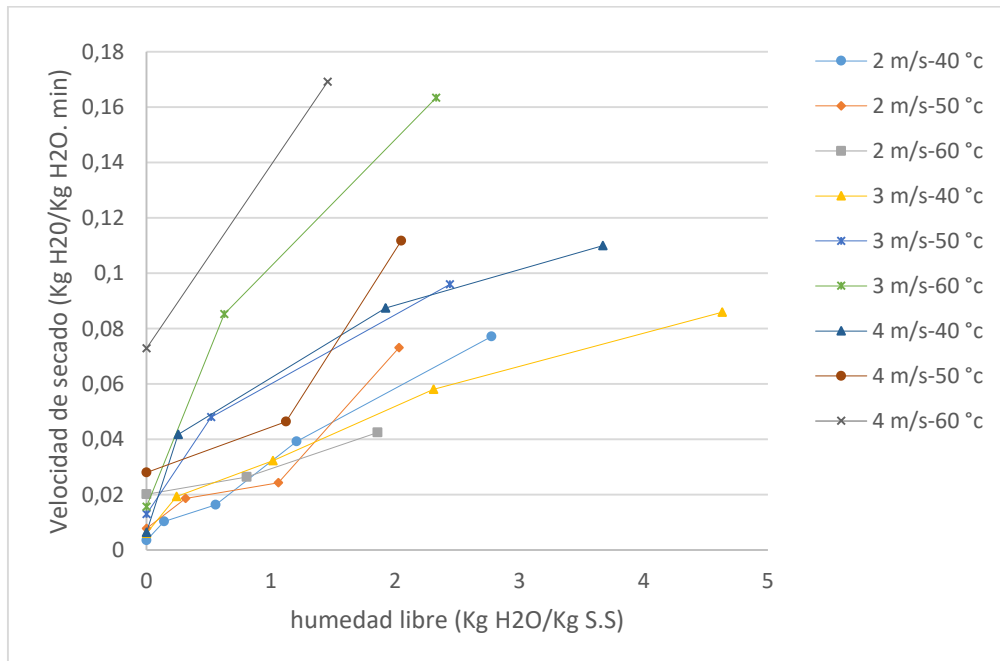


Figura 6. Curvas de velocidad de secado de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)

En la Figura 5 se observan las curvas de velocidad de secado de cáscara de sandía en las condiciones experimentales establecidas. Como se evidencia, se presenta un comportamiento clásico de curvas de secado para material vegetal, con una velocidad inicial alta seguida de un primer período de velocidad decreciente, dado que al comienzo del proceso la humedad es tan elevada, que el sólido no constituye una resistencia para la transferencia de masa y, mientras que avanza el secado la humedad que fluye del interior del sólido, es dominada por el proceso difusivo, derivando esto en una tendencia a la baja de la velocidad de secado (Ibarz y Barbosa, 2011). Esta misma senda siguen las curvas de velocidad de secado obtenidas por (Białobrzewski, 2007) para el secado con aire caliente de la raíz de apio.

Así mismo, también se puede observar el período de velocidad constante, aunque la curva tenga una leve pendiente, dado que las resistencias internas por encogimiento empiezan a aparecer (Delgado et al., 2014). De lo anterior quedan exceptuados los tratamientos 6 (3 m/s-60 °C) y 9 (4 m/s-60 °C) que tienen las temperaturas y velocidades del aire más altas, razón por la cual la remoción de agua se lleva a cabo de forma tan rápida que resulta imposible reemplazar el agua eliminada de la superficie a la misma velocidad que se lleva a cabo el proceso de secado, lo que finalmente provoca que la velocidad de secado disminuya de forma acelerada; hecho que también se observa en el estudio de (Montes et al., 2008) para el secado de ñame en capa delgada, de las variedades 9811-089 y 9811-091, en un secador de laboratorio tipo bandeja a distintas temperaturas y velocidades del aire.

De igual manera, en todas las curvas de velocidad de secado se evidencia un segundo período de velocidad decreciente en la etapa final, típico de curvas de velocidad de secado para distintos materiales (Geankoplis, 1998), que predomina durante la mayor parte del proceso, en el cual la disminución de la velocidad de secado se acentúa por el encogimiento y por la disminución de la humedad, con lo cual la cantidad de agua que se difunde del interior del sólido a la superficie es considerablemente menor a la tasa de remoción de humedad en la superficie (Treybal, 2013).

8.3. Curva de encogimiento

En la Figura 7 se representa la gráfica de encogimiento de la cáscara de sandía en función del tiempo, la cual tiene un comportamiento de tipo exponencial decreciente, como se observa en la línea de tendencia. Se puede apreciar cómo durante la mayor parte del tiempo que demora el secado las láminas de cáscara de sandía (que tienen un espesor inicial de 5×10^{-3} m) permanecen por debajo de 1×10^{-3} m. Igualmente, se puede deducir que el encogimiento se desarrolla a mayor velocidad en los primeros instantes del secado y va disminuyendo, sufriendo una paulatina desaceleración hasta que casi desaparece al final del proceso, comportamiento similar a la curva de secado.

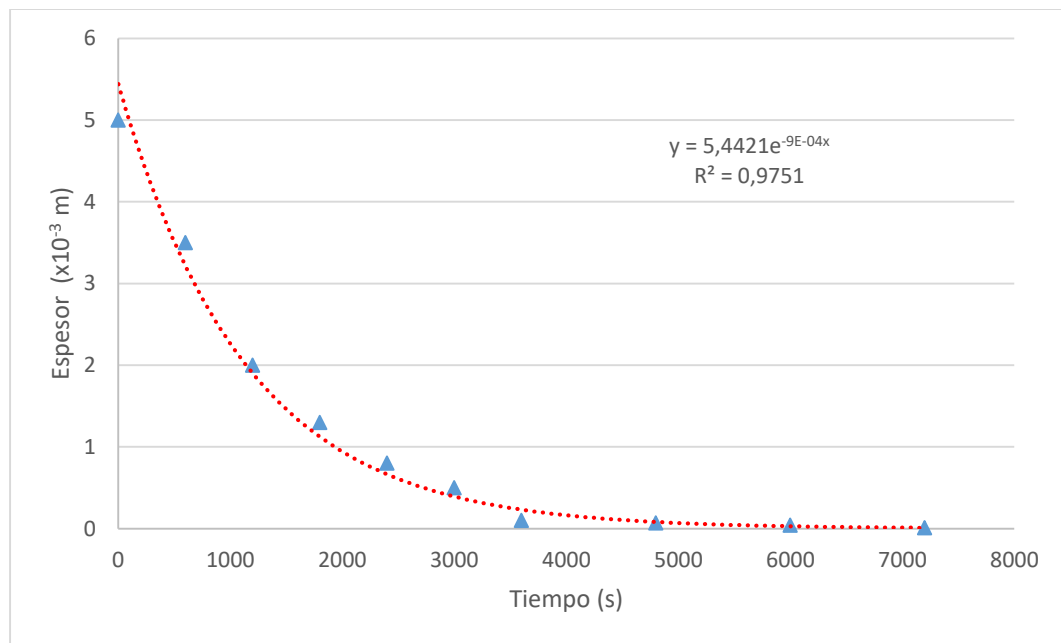


Figura 7. Curva de encogimiento cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)

En la Figura 8 se muestra la curva de encogimiento de cáscara de sandía en función de la humedad absoluta. Se observa a través de la línea de tendencia y la ecuación del gráfico como el espesor disminuye de manera exponencial a medida que la humedad de la placa de cáscara de sandía se hace menor, comportamiento que también se puede apreciar en el estudio de secado de placas de papaya llevado a cabo por (Lemus et al., 2013). Esto se debe a que a medida que se remueve agua del producto los poros se cierran provocando una reducción del

espesor inicial del mismo (Ibarz y Barbosa, 2011), hecho que se desarrolla mas rápidamente durante la primera etapa del secado cuando la velocidad de secado es mayor y va disminuyendo hasta que al final del proceso cuando la humedad es muy baja el espesor permanece sin variaciones significativas.

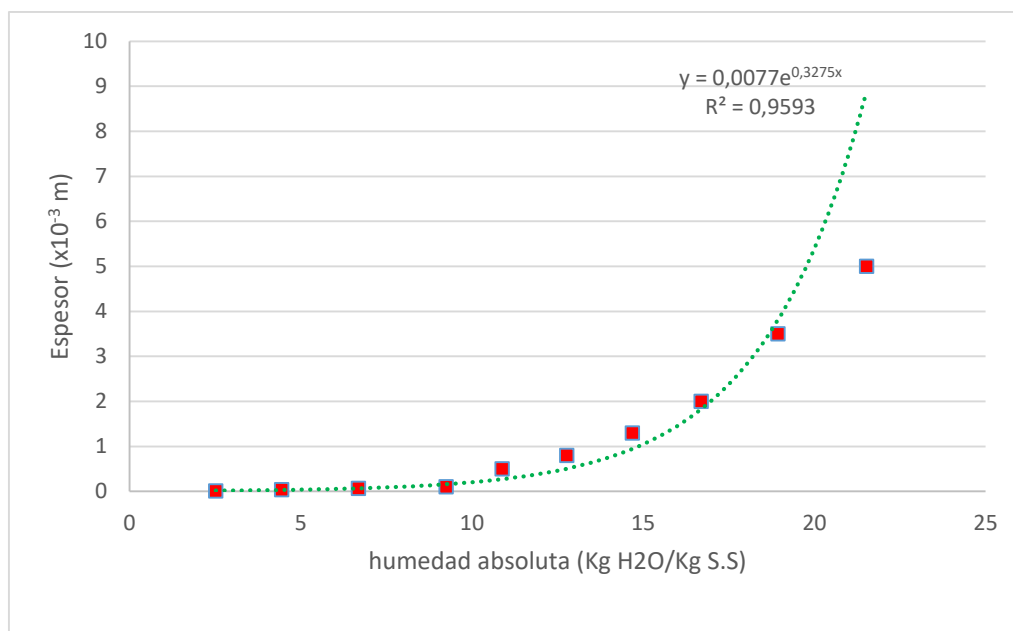


Figura 8. Curva de encogimiento cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)

8.4. Difusividad efectiva

En la Tabla 4 se observan los datos de difusividad efectiva de la cáscara de sandía (a las condiciones experimentales planteadas), los cuales están entre $7,58 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1,90 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, valores que se encuentran dentro del rango de difusividad efectiva para materiales vegetales que es de 1×10^{-6} a $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (Kumar et al., 2014). En el mismo sentido, estos datos se asemejan a los valores de difusividad efectiva para cáscara de sandía a velocidad del aire de 1 m/s y temperaturas de 40, 50 y 60 °C reportados por (Portela et al., 2015), aproximadamente $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabla 4. Difusividad efectiva de la cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*)

VELOCIDAD \ TEMPERATURA	40 °C	50 °C	60 °C
2 m/s	$7,58 \times 10^{-10}$	$7,96 \times 10^{-10}$	$8,69 \times 10^{-10}$
3 m/s	$7,91 \times 10^{-10}$	$9,84 \times 10^{-10}$	$1,87 \times 10^{-9}$
4 m/s	$8,51 \times 10^{-10}$	$1,04 \times 10^{-9}$	$1,90 \times 10^{-9}$

* Las unidades de la difusividad efectiva son m^2/s

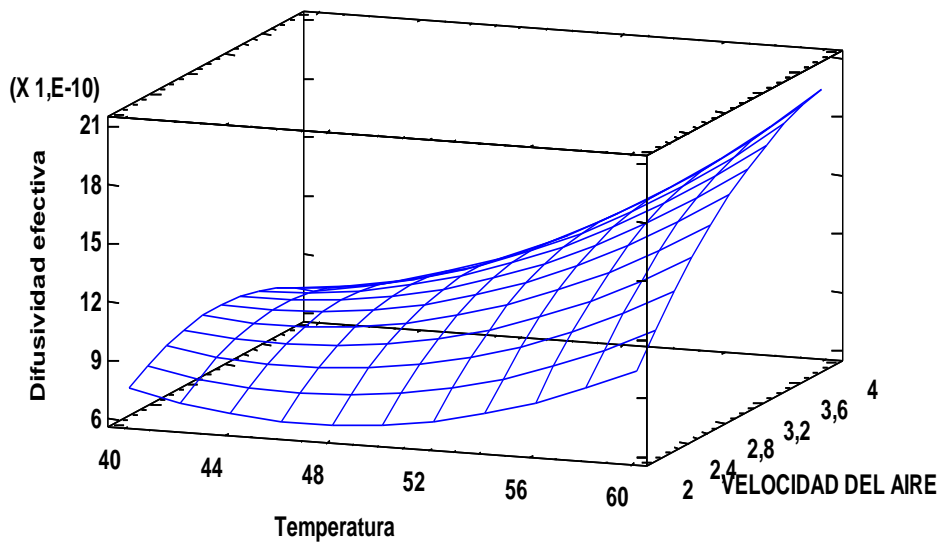


Figura 9. Superficie de respuesta de la variable difusividad efectiva.

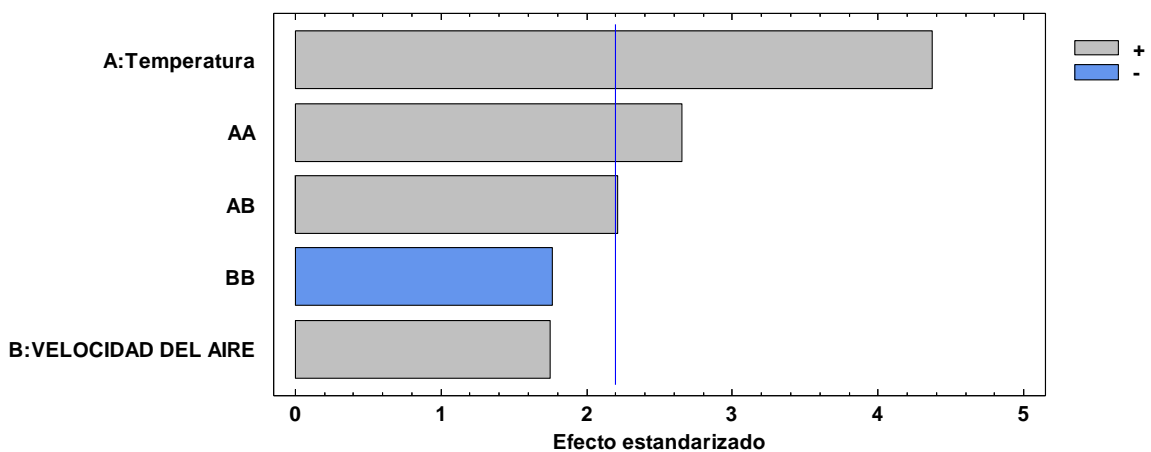


Figura 10. Diagrama de Pareto estandarizada para difusividad efectiva.

Según la ANOVA, con un nivel de confianza del 95%, el mejor tratamiento es el tratamiento 9 (60 °C- 4 m/s) el cual presenta la temperatura y velocidad del aire más alta. En la Figura 9 se observa que a medida que aumentan la temperatura y la velocidad del aire se incrementa la difusividad efectiva, este hecho se debe a que a estas condiciones el efecto del encogimiento es menor, lo que provoca que haya menos resistencias internas a la difusión de agua del interior del sólido a la superficie, sumando a lo anterior una mayor evaporación producto de la temperatura y un mayor arrastre de humedad que provoca una mayor velocidad del aire (Treybal, 2013). En la Figura 10 se advierte que el factor que más influencia tiene en el comportamiento de la difusividad efectiva es la temperatura, seguida de la interacción temperatura-velocidad del aire, mientras que la velocidad del aire no tiene un efecto significativo sobre la difusividad efectiva; este mismo comportamiento lo reportaron (Moreira et al., 2005) en su estudio de modelado matemático de secado de castaña a temperaturas de 45-65 °C y velocidades del aire de 1,8-2,7 m/s.

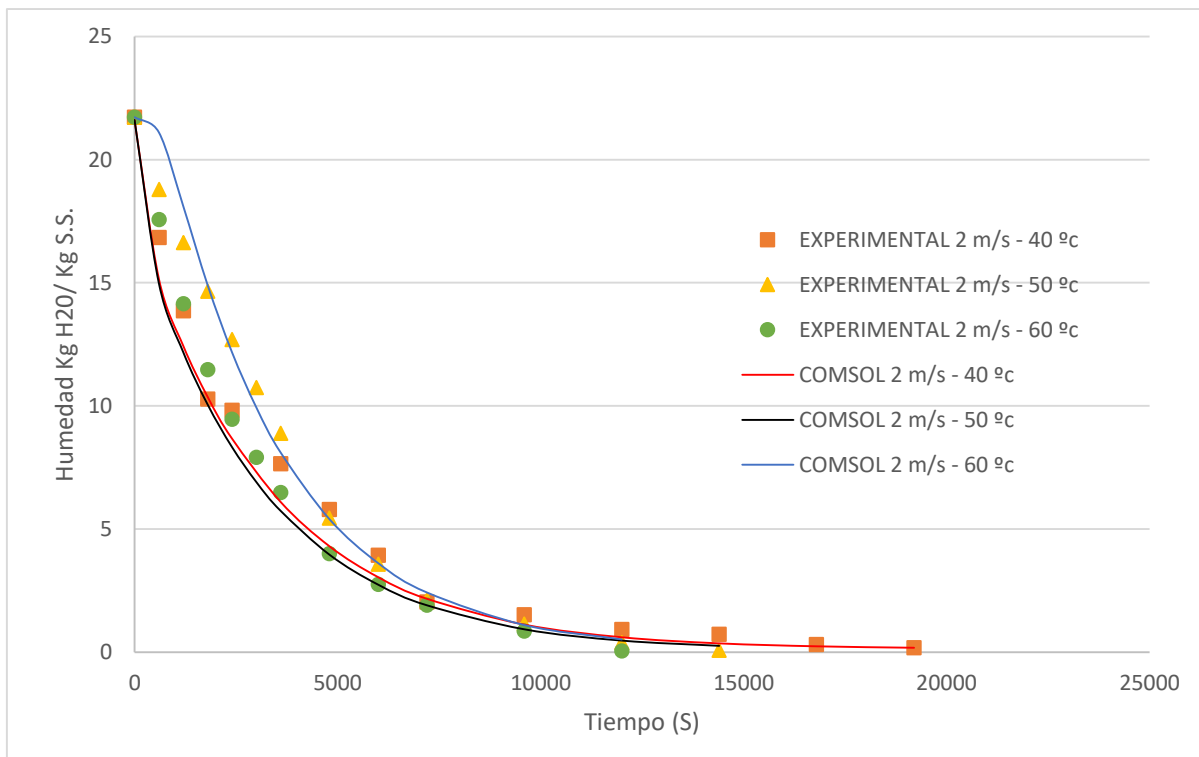


Figura 11. Simulación en COMSOL Multiphysics a velocidad del aire de 2 m/s

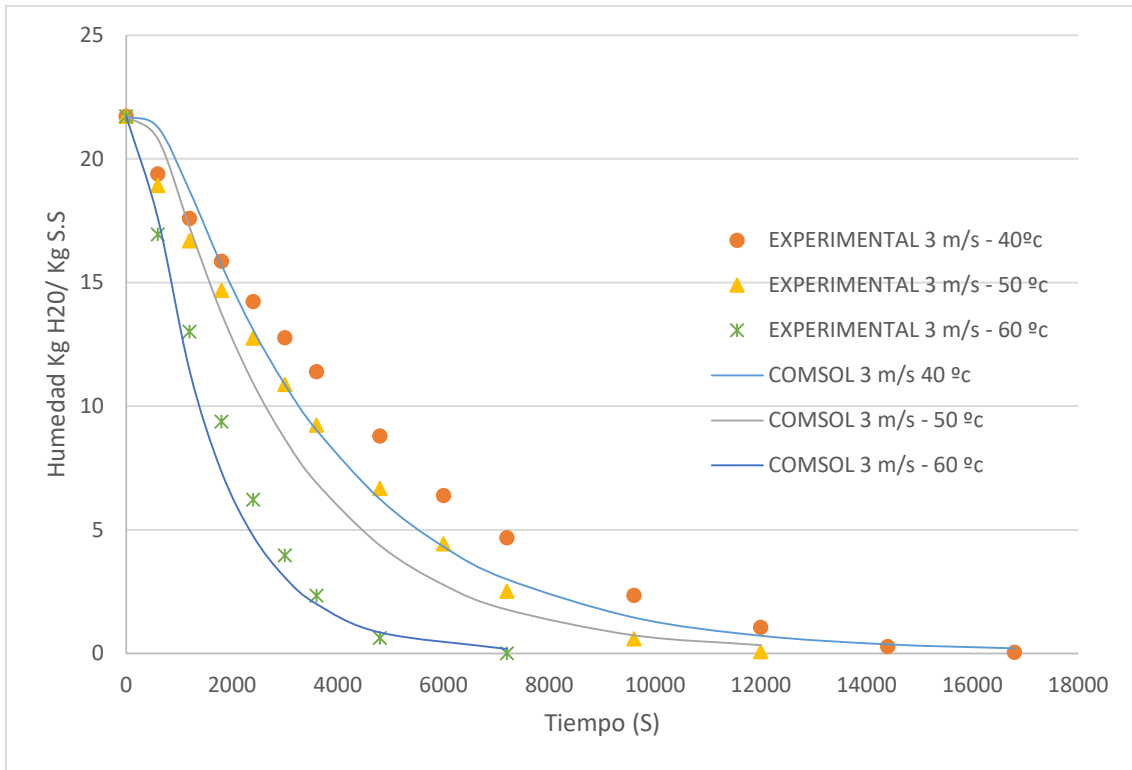


Figura 12. Simulación en COMSOL Multiphysics a velocidad del aire de 3 m/s

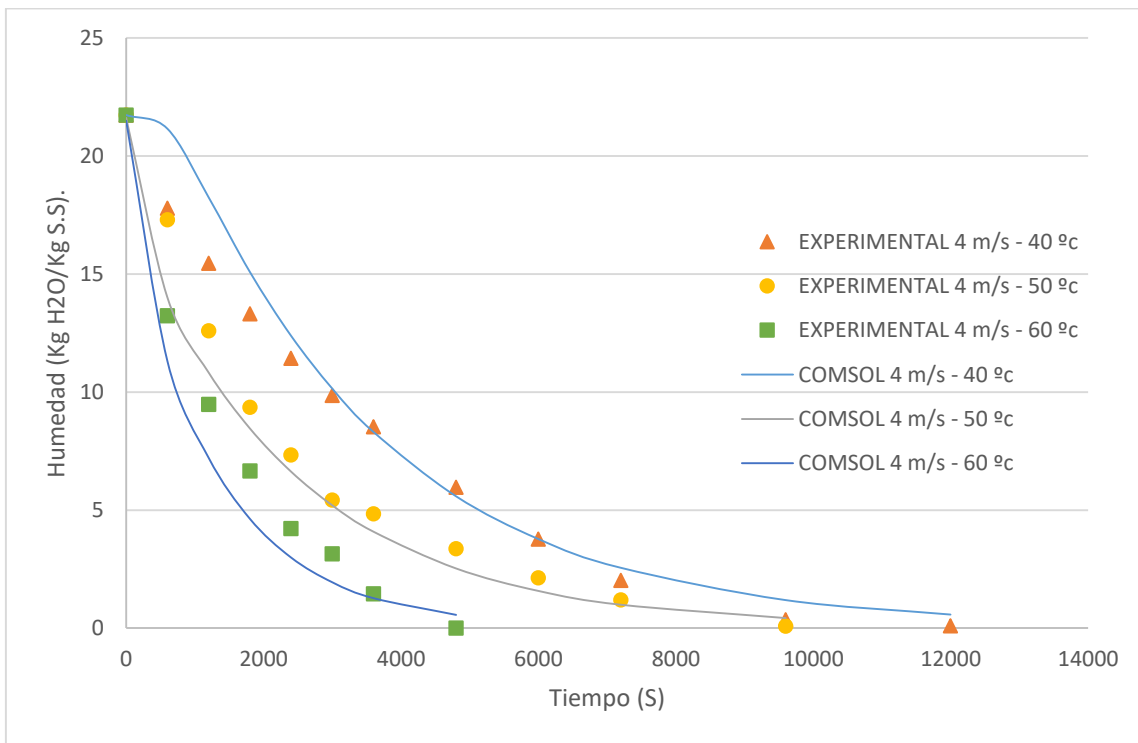


Figura 13. Simulación en COMSOL Multiphysics a velocidad del aire de 4 m/s

En las Figuras 11 a 13 se muestran las simulaciones realizadas en el software COMSOL Multiphysics versión 3.5 para cada tratamiento teniendo en cuenta los respectivos valores de difusividad efectiva y las condiciones iniciales y de frontera. Se observa que las curvas de secado simuladas se ajustan a las experimentales, lo que implica que los valores de difusividad efectiva obtenidos son muy confiables. En la Tabla 5 se muestran los coeficientes de determinación (R^2) entre los datos experimentales y simulados para cada tratamiento, los cuales están entre 0,942 y 0,991, valores que representan un buen ajuste si se tiene en cuenta que las simulaciones en COMSOL se llevan a cabo mediante la solución numérica de la ecuación de la primera ley de Fick y los valores de difusividad efectiva se calcularon mediante la solución analítica o simplificada de la ecuación 9 teniendo en cuenta el encogimiento.

Tabla 5. Coeficientes de determinación entre los datos experimentales y los datos simulados en COMSOL

Velocidad del aire (m/s)	Temperatura (°C)	Coefficiente de determinación (R^2)
2	40	0,991
2	50	0,942
2	60	0,973
3	40	0,974
3	50	0,971
3	60	0,985
4	40	0,980
4	50	0,982
4	60	0,980

Fuente: Autores (2018)

8.5. Modelado matemático de las curvas de secado

La constante K (también llamada constante de secado) es un parámetro empírico del comportamiento cinético, la misma depende de la cinética de secado del material y la constante A (también llamada coeficiente de secado) es un parámetro empírico característico del producto (Torregroza et al., 2014). En la Tabla 6 se observan los parámetros empíricos y estadísticos de los tres modelos aplicados en este estudio. Al analizar los parámetros empíricos se observa que la constante K, para los modelos de Newton y Henderson y Pabis,

y la constante A, para los modelos de Page y Henderson y Pabis, aumentan en función de la temperatura y la velocidad del aire. La constante K para el modelo de Page rompe con la tendencia antes descrita. Esta misma senda siguen los resultados reportados por (Montes et al., 2008) para secado de ñame a distintas condiciones de temperatura y velocidad del aire.

En el mismo sentido, se deduce a partir de los parámetros estadísticos de ajuste que todos los modelos estudiados se ajustan adecuadamente a las curvas de secado de cáscara de sandía, a las condiciones de temperatura y velocidad del aire establecidas, en cuanto el R^2 se encuentra en valores cercanos a 0,99 y los valores de SSE, X^2 y RMSE cercanos a cero en todos los tratamientos. Sin embargo, el modelo de Page es el que mejor ajusta las curvas de secado experimentales dado que presenta el valor de R^2 más alto con un promedio de 0,9969 contra 0,9944 del modelo de Newton y 0,9934 del modelo de Henderson y Pabis; así mismo, presenta los valores de SSE y RMSE más bajos (0,0044 y 0,0179 en promedio respectivamente), en comparación con el modelo de Henderson y Pabis (0,0096 y 0,0279) y el modelo de Newton (0,0194 y 0,0295). Esto concuerda con lo reportado en la literatura, donde se establece que el modelo de Page es uno de los que mejor se ajusta al secado de materiales vegetales (Khan et al., 2016).

En las Figuras 14 a Figura 22 se muestran las curvas de secado adimensionales experimentales y estimadas con cada uno de los modelos estudiados a las condiciones de velocidad y temperatura establecidas, en las cuales se puede observar un alto grado de ajuste en concordancia con los parámetros estadísticos que se muestran en la Tabla 6, al encontrarse las curvas experimentales muy cerca de las estimadas.

Tabla 6. Parámetros empíricos y estadísticos de los modelos de Newton, Page y Henderson & Pabis

Modelo	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura (°C)	K (s ⁻¹)	A	SSE	X ²	RMSE	R ²
Modelo de Newton	2	40	0,000189	-----	0,0125	0,328	0,0299	0,9930
		50	0,000261	-----	0,0169	0,320	0,0361	0,9931
		60	0,000348	-----	0,0007	0,306	0,0074	0,9994
	3	40	0,000197	-----	0,0133	0,319	0,0308	0,9960
		50	0,000249	-----	0,0147	0,308	0,0350	0,9939
		60	0,000512	-----	0,0140	0,318	0,0394	0,9916
	4	40	0,000283	-----	0,0086	0,306	0,0267	0,9941
		50	0,000335	-----	0,0068	0,303	0,0248	0,9948
		60	0,000595	-----	0,0875	0,316	0,0357	0,9933
Modelo de Henderso y Pabis	2	40	0,000188	0,9927	0,0124	0,327	0,0298	0,9933
		50	0,000274	1,0389	0,0139	0,326	0,0328	0,9916
		60	0,000346	0,9955	0,0006	0,306	0,0072	0,9995
	3	40	0,000206	1,0319	0,0109	0,325	0,0279	0,9945
		50	0,000260	1,0335	0,0124	0,314	0,0322	0,9920
		60	0,000533	1,0396	0,0118	0,324	0,0362	0,9899
	4	40	0,000284	1,0014	0,0086	0,307	0,0267	0,9940
		50	0,000336	1,0034	0,0067	0,304	0,0248	0,9947
		60	0,000613	1,0321	0,0088	0,321	0,0332	0,9916
Modelo de Page	2	40	0,000133	1,0415	0,0118	0,331	0,0291	0,9931
		50	0,000041	1,2265	0,0034	0,332	0,0162	0,9978
		60	0,000386	0,9867	0,0006	0,306	0,0071	0,9995
	3	40	0,000046	1,1729	0,0029	0,330	0,0145	0,9983
		50	0,000051	1,1935	0,0040	0,320	0,0182	0,9971
		60	0,000061	1,2787	0,0015	0,330	0,0128	0,9986
	4	40	0,000284	1,0014	0,0086	0,307	0,0267	0,9940
		50	0,000189	1,0711	0,0054	0,307	0,0221	0,9953
		60	0,000105	1,2289	0,0017	0,326	0,0147	0,9982

Fuente: Autores (2018)

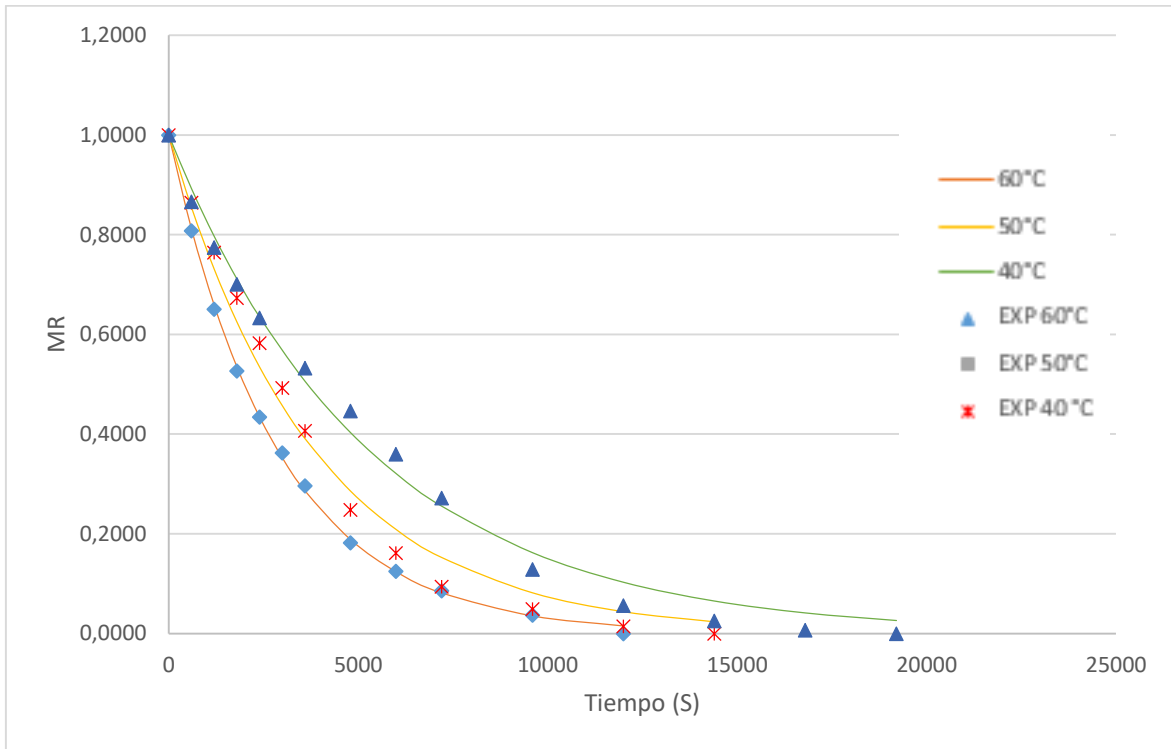


Figura 14. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Newton a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 2 m/s.

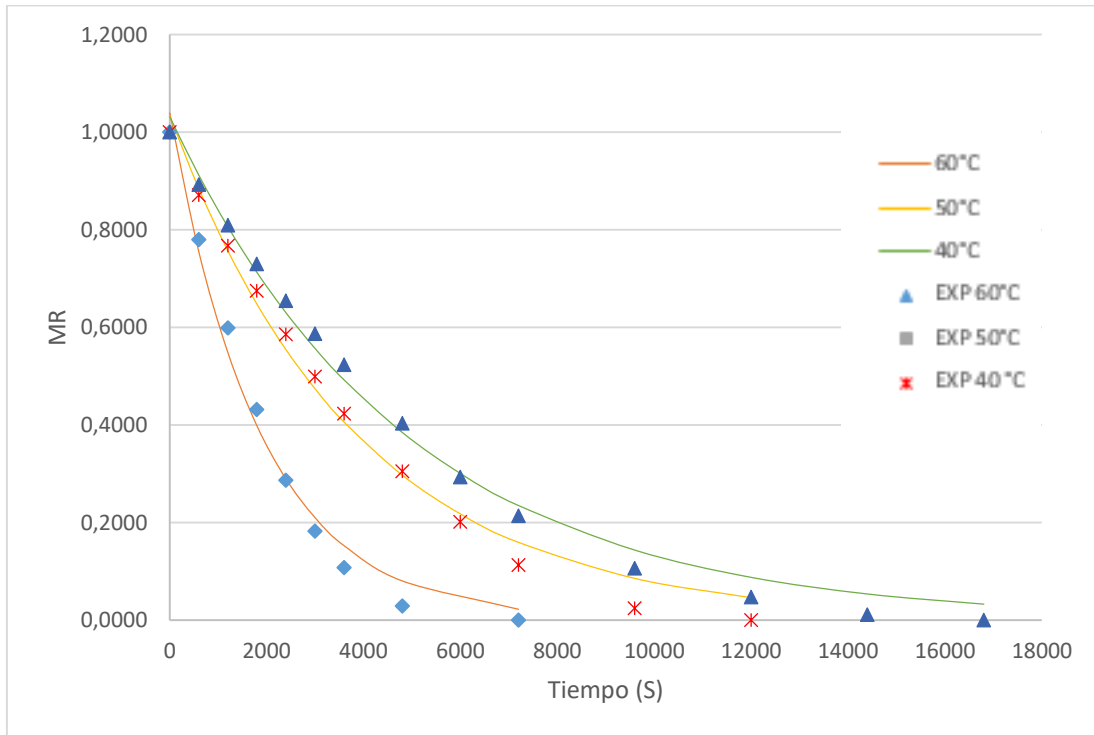


Figura 15. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Newton a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 3 m/s.

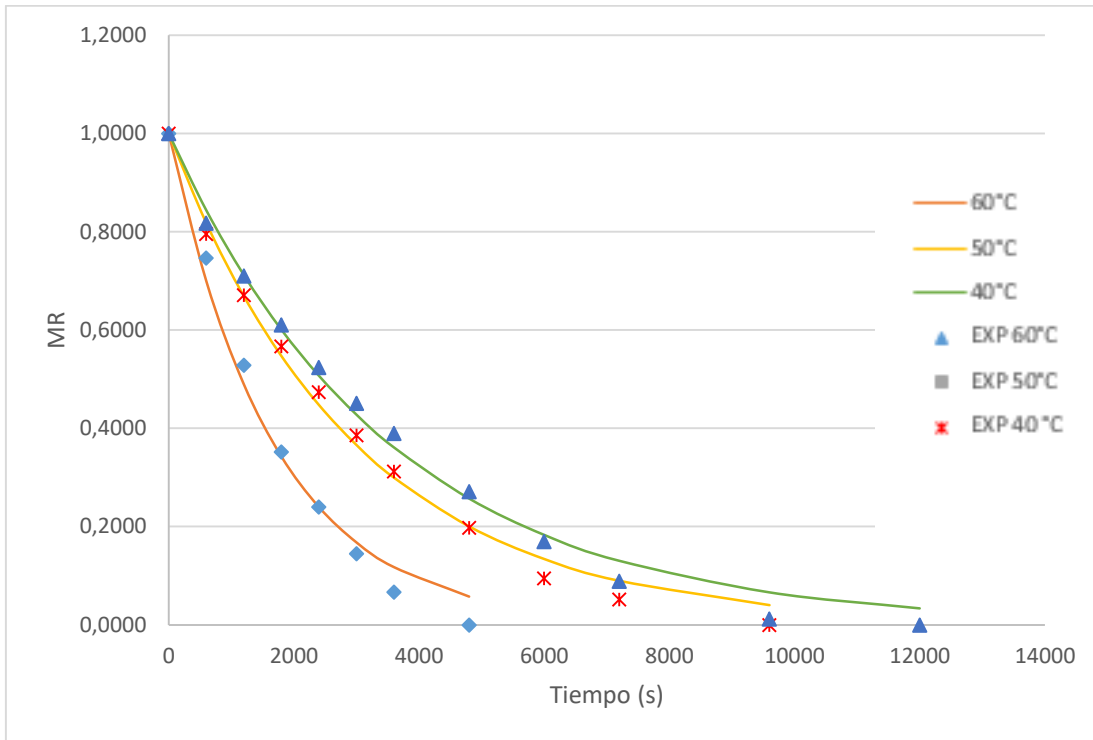


Figura 16. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Newton a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 4 m/s.

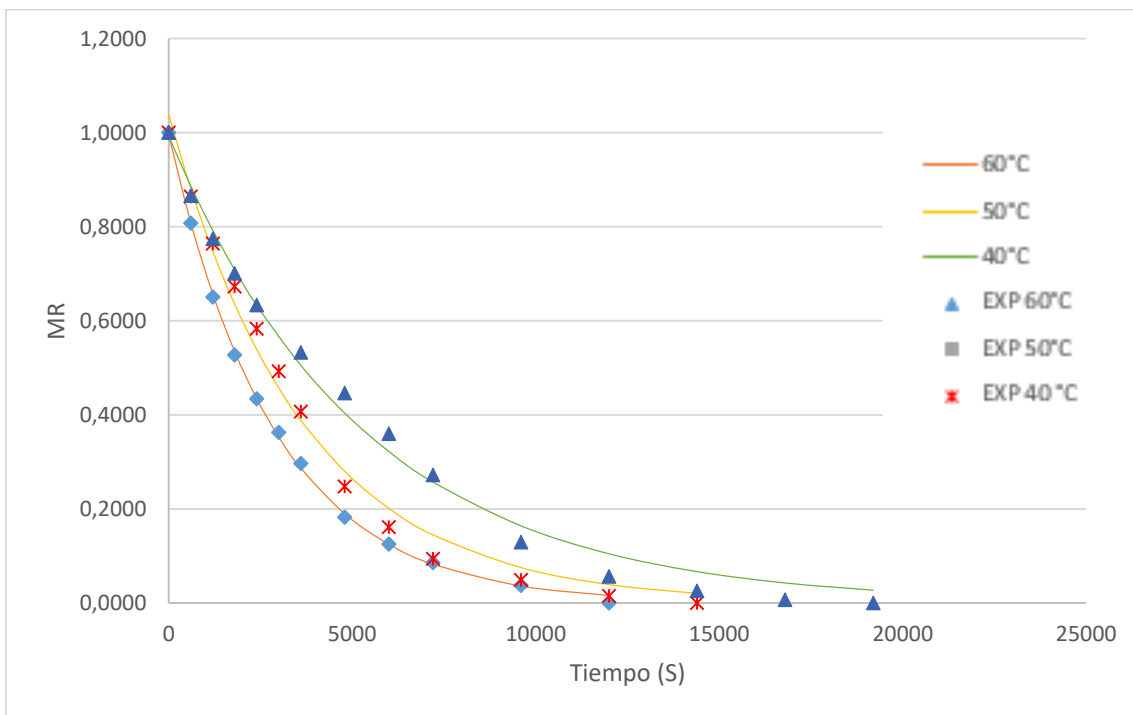


Figura 17. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Henderson y Pabis a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 2 m/s.

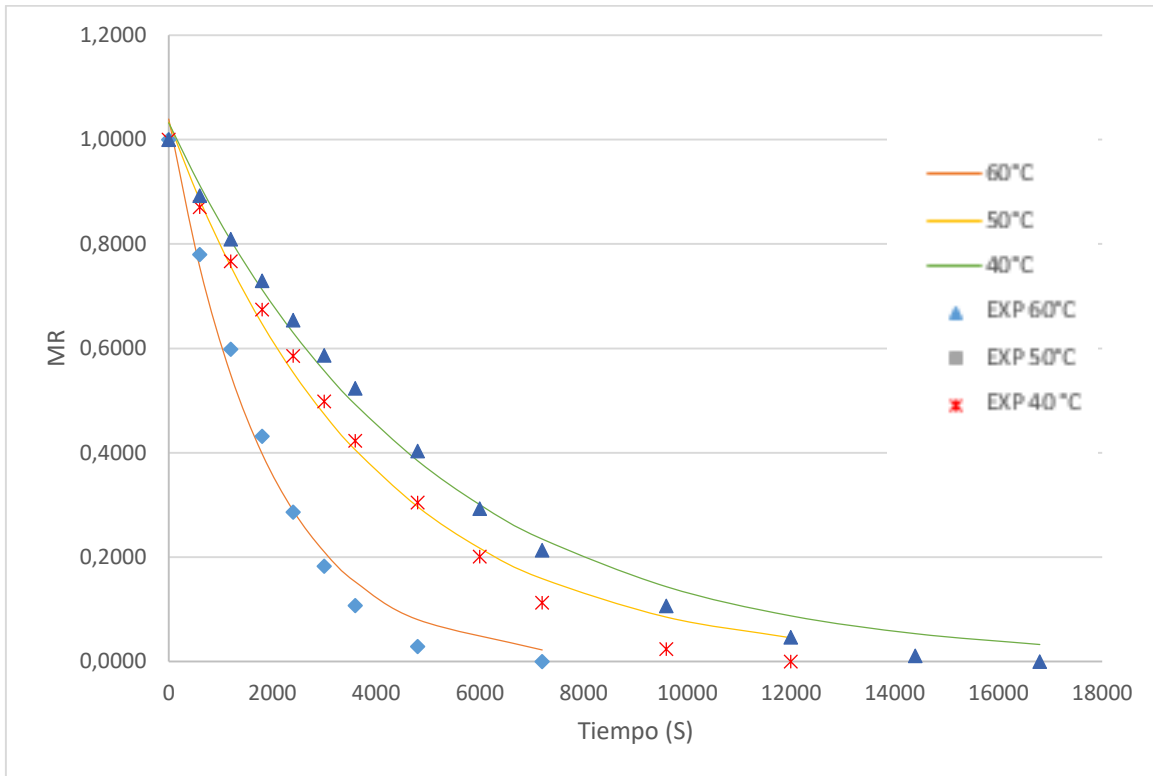


Figura 18. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Henderson y Pabis a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 3 m/s.

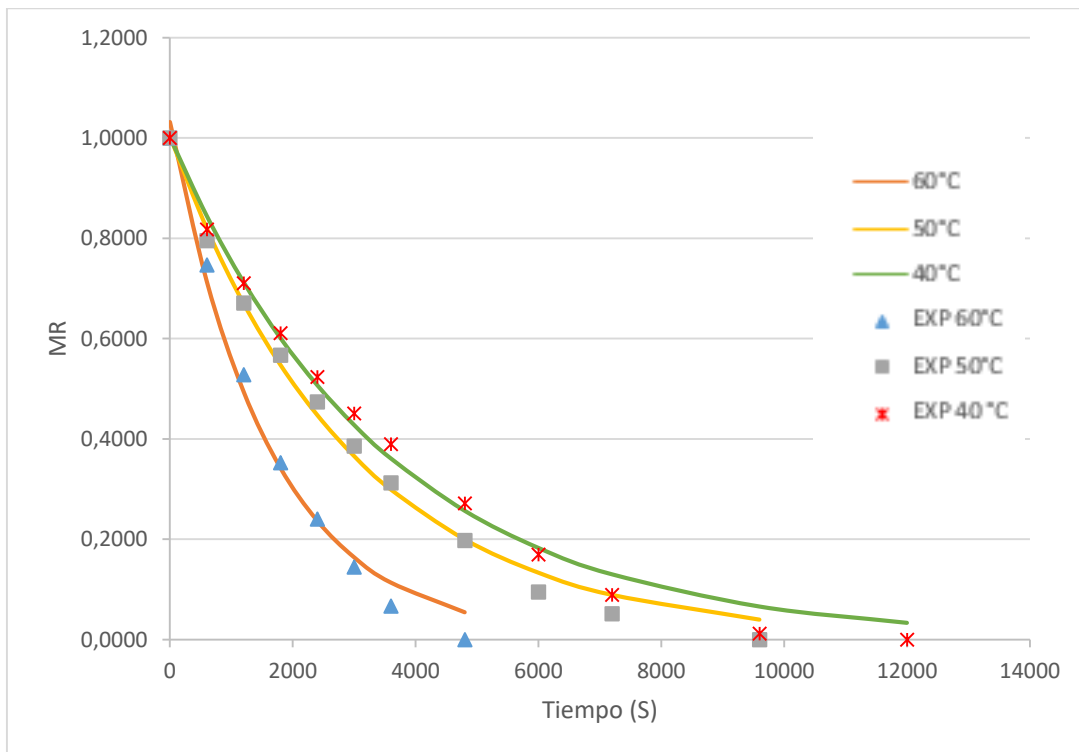


Figura 19. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Henderson y Pabis a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 4 m/s.

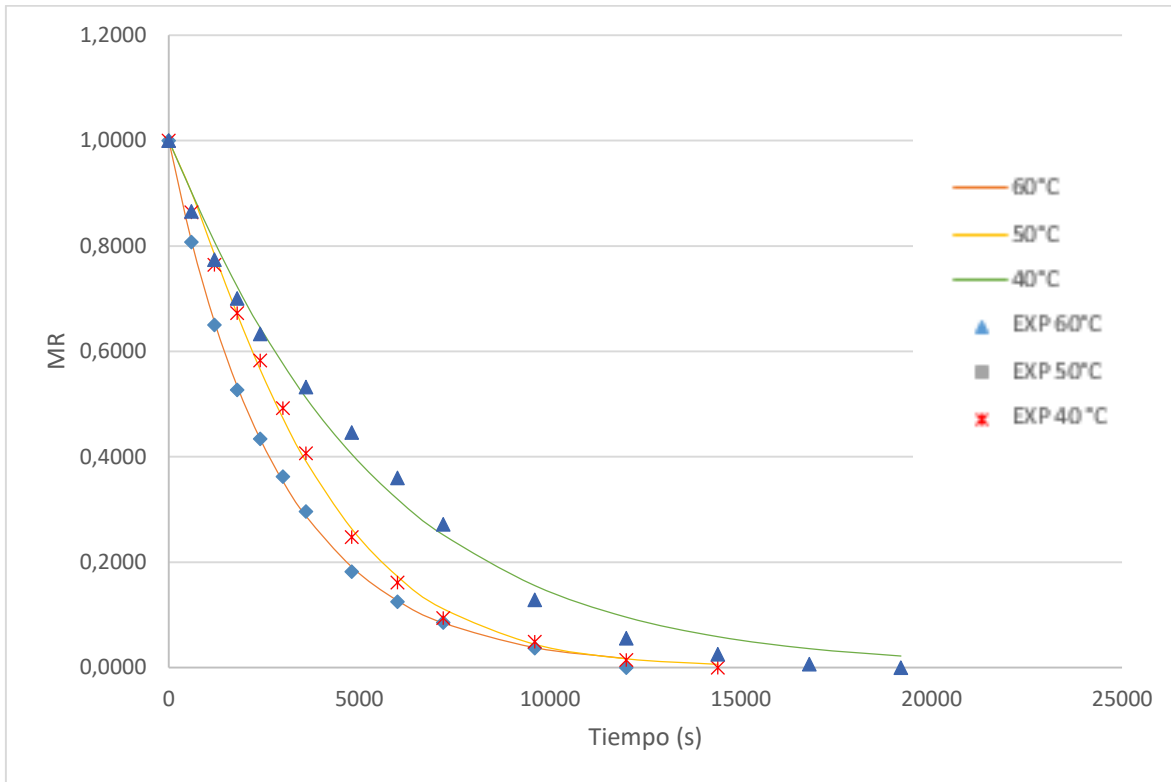


Figura 20. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Page a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 2 m/s

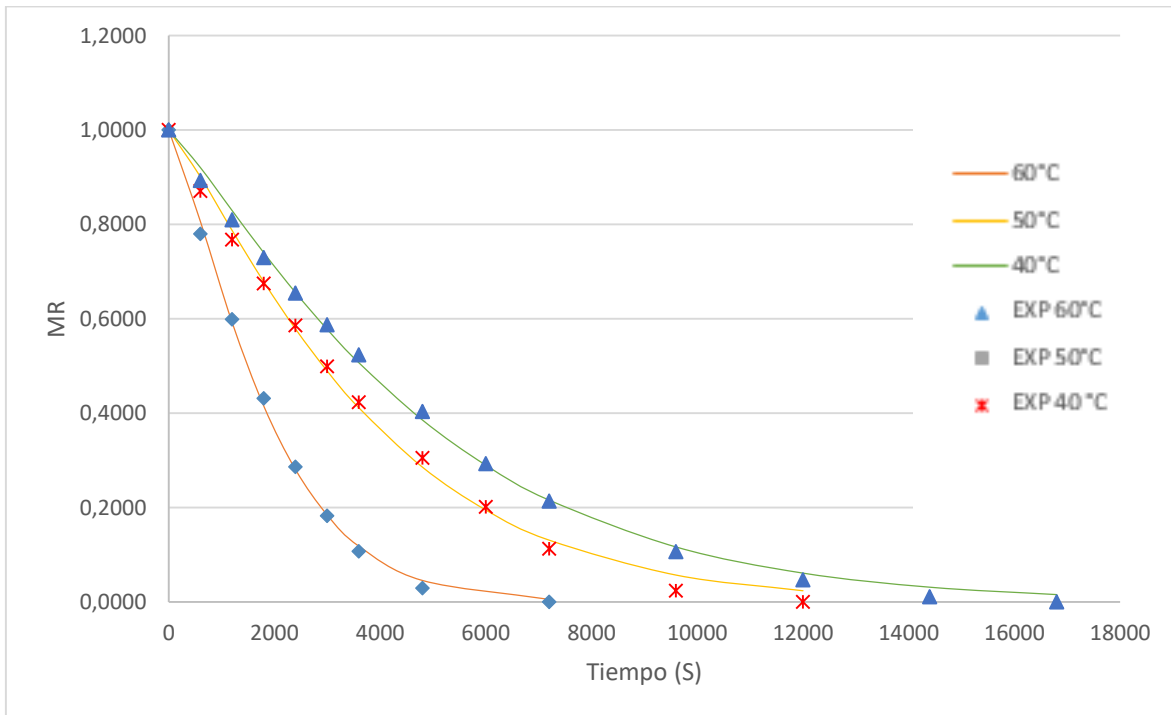


Figura 21. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Page a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 3 m/s

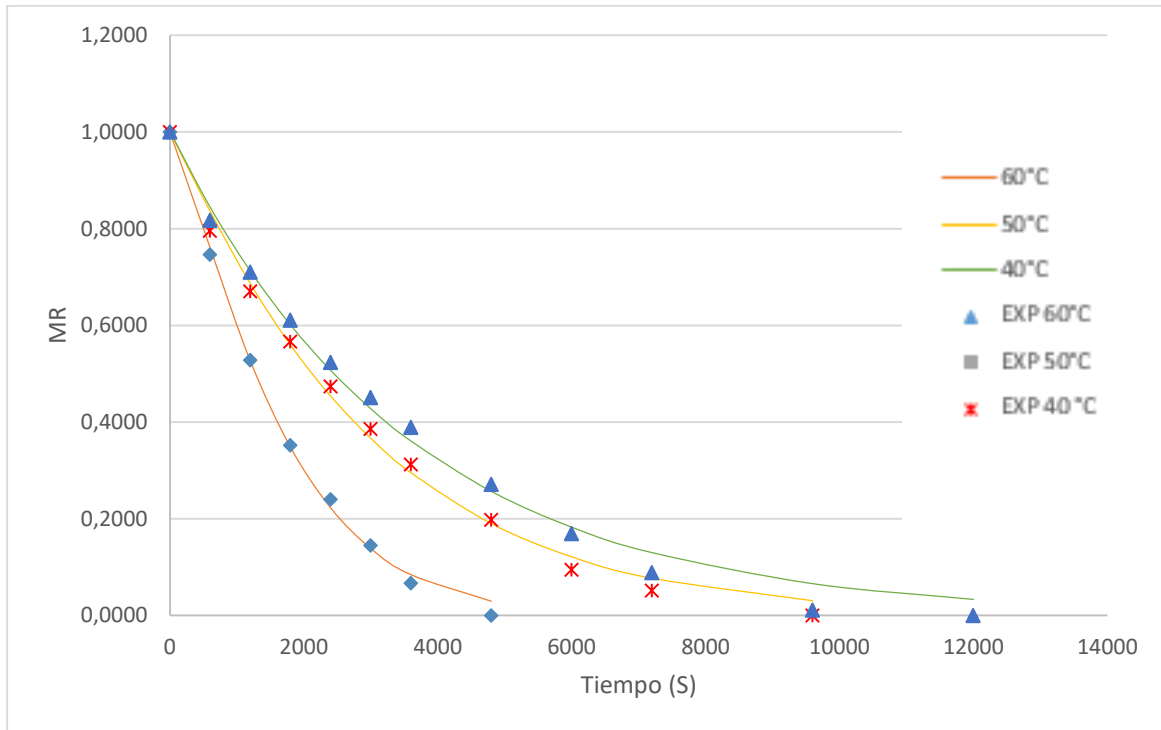


Figura 22. Curvas de secado adimensional de cáscara de sandía (*Citrullus lanatus*) estimada con el modelo de Page a diferentes temperaturas y velocidad del aire de 4 m/s

8.6. Coeficiente de transferencia de calor

En la Tabla 7 se muestran el número de Reynolds y los coeficientes de transferencia de calor a las condiciones planteadas en este estudio. Se observa que el régimen de flujo en todos los tratamientos es turbulento, dado que el número de Reynolds está por encima de 4000 (Bird, 2006). Los valores del coeficiente de transferencia de calor obtenidos están entre 12,03 y 21,70 $\text{w/m}^2 \text{K}$, siendo estos similares a los reportados por (Tzempelikos et al., 2015) para el secado de rodajas de membrillo a temperaturas de 40, 50 y 60 °C y velocidades del aire de 1 y 2 m/s que oscilan entre 13,02 y 46,2 $\text{w/m}^2 \text{K}$.

También se evidencia un aumento del coeficiente de transferencia de calor a medida que aumenta la velocidad del aire, este hecho se debe a que al incrementarse la velocidad aumenta el número de Reynolds, lo que indica una mayor turbulencia en el flujo, provocando un aumento en la transferencia de calor en el sistema (Geankoplis, 1998). Igualmente, el

coeficiente de transferencia de calor experimenta una disminución a medida que se incrementa la temperatura en todos los tratamientos, comportamiento que coincide con lo reportado por (Sfredo et al., 2005) en su estudio de secado de frutos de café a distintas temperaturas (45 y 60 °C) y frecuencias de vibración (0.211×10^{-3} y 0.945×10^{-3} m). Esto se debe a que al aumentar la temperatura, la difusión de agua en el sólido es mayor a expensas de un incremento de la absorción de calor de la fuente, en este caso la corriente de aire, lo que provoca una disminución en el coeficiente de transferencia de calor (McCabe et al., 2007).

Tabla 7. Coeficientes de transferencia de calor a diferentes condiciones de velocidad y temperatura.

Velocidad del aire (m/s)	Temperatura (°C)	N° de Reynolds	Coefficiente de transferencia de calor (w/m² K)
2	40	35255,47	12,46
2	50	33377,48	12,24
2	60	31643,42	12,03
3	40	52883,21	17,24
3	50	50066,22	16,93
3	60	47465,13	16,64
4	40	70510,94	21,70
4	50	66754,96	21,31
4	60	63286,85	20,94

Fuente: Autores (2018)

8.7. Coeficiente de transferencia de masa

En la Tabla 8 se muestran los coeficientes de transferencia de masa, a las condiciones establecidas en este estudio, cuyo valor oscila entre $3,761 \times 10^{-7}$ y $1,289 \times 10^{-6}$ m/s. Estos datos están en concordancia con los reportados por (Lemus et al., 2013) para el secado de placas de papaya a velocidad del aire constante y distintas temperaturas (40, 50, 60, 70 y 80 °C), los cuales se encuentran en un rango de $3,10 \times 10^{-7}$ a $6,05 \times 10^{-6}$ m/s.

De igual forma, es evidente un aumento del coeficiente de transferencia de masa a medida que se incrementan la temperatura y la velocidad del aire. Este hecho se debe a que al aumentar la temperatura y la velocidad del aire la difusividad efectiva es mayor, lo que

implica un incremento en la transferencia de masa entre el producto y la corriente de aire, comportamiento que también reportó (Ndukwu et al., 2017) para el secado de distintas variedades de cocoyam a temperaturas de 50, 60 y 70 °C.

Tabla 8. Coeficientes de transferencia de masa a diferentes condiciones de velocidad y temperatura.

Velocidad del aire (m/s)	Temperatura (°C)	Coeficiente de transferencia de masa (m/s)
2	40	$3,761 \times 10^{-7}$
2	50	$5,184 \times 10^{-7}$
2	60	$7,404 \times 10^{-7}$
3	40	$5,203 \times 10^{-7}$
3	50	$7,170 \times 10^{-7}$
3	60	$1,024 \times 10^{-6}$
4	40	$6,549 \times 10^{-7}$
4	50	$9,025 \times 10^{-7}$
4	60	$1,289 \times 10^{-6}$

Fuente: Autores (2018)

9. CONCLUSIONES

El secado convectivo con aire caliente fue llevado a cabo en un secador de bandejas tipo túnel y se obtuvo que el tratamiento que mayor reducción de humedad presentó fue el de mayor temperatura (60 °C) y mayor velocidad de aire (4 m/s).

Se estudió el proceso de secado de cáscara de sandía con aire caliente, analizando la influencia de la temperatura y la velocidad del aire de secado. Se ha comprobado que la temperatura es el factor que afecta más significativamente el proceso de secado.

La difusividad efectiva de humedad ha sido determinada mediante la solución analítica de la segunda ecuación de Fick, obteniendo que el tratamiento con mayor temperatura (60 °C) y mayor velocidad del aire (4 m/s) fue el que presentó el mayor valor de difusividad efectiva ($1,90 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$). De igual forma la fiabilidad de estos valores ha sido evaluada mediante simulaciones en el software COMSOL Multiphysics versión 3.5 mediante la solución numérica de la primera ley de Fick, con altos valores de coeficiente de determinación al comparar las simulaciones con los datos experimentales, lo que da un buen nivel de confianza a los valores de difusividad efectiva calculados.

Se logró modelar la cinética de secado de cáscara de sandía a través de los modelos matemáticos de Newton, Pages y Henderson y Pabis. El modelo de Pages fue el que mejor ajuste presentó en concordancia con lo reportado por la literatura.

Se determinaron los coeficientes de transferencia de masa y calor a partir de las condiciones de flujo, teniendo en cuenta el número de Reynolds. Todos los regímenes de flujo para cada uno de los tratamientos utilizados en esta investigación son turbulentos. Así mismo, los mayores valores de coeficiente de transferencia de calor y coeficiente de transferencia de masa se obtuvieron en los tratamientos de mayor velocidad del aire (4 m/s).

10. RECOMENDACIONES

1. Efectuar un pretratamiento a la cáscara de sandía, ya sea mediante prensado o secado al sol, antes de someterla a secado con aire caliente con el propósito de reducir la elevada humedad inicial del material y disminuir de esta manera los tiempos de secado.
2. Evaluar otros métodos de secado que permitan obtener una mayor eficiencia de remoción de humedad del material en un menor intervalo de tiempo, entre ellos el secado con microondas.
3. Estudiar otros modelos matemáticos para el ajuste de las curvas de secado experimentales de cáscara de sandía, como por ejemplo, los modelos exponencial, empírico, midili, entre otros.
4. Llevar a cabo un estudio de la variación volumétrica de las placas de cáscara de sandía durante el secado con aire caliente a diferentes condiciones de temperatura y velocidad del aire y calcular el coeficiente de transferencia de masa teniendo en cuenta el cambio de volumen a través del tiempo.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, C., Sanchez, E., & Young, M. E. (2007). Heat and mass transfer coefficients for natural convection in fruit packages. *Journal of Food Engineering*, 80, 655–661. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.001>
- Agnelli, M. E., Marani, C. M., & Mascheroni, R. H. (2005). Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits. *Journal of Food Engineering*, 69(4), 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.034>
- Akoy, E. O. M. (2014). Experimental characterization and modeling of thin-layer drying of mango slices. *International Food Research Journal*, 21(5), 1911–1917.
- Andrade, E.T.de; Borém, F.M.; Hardoim, P. R. (2003). Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. *Revista Brasileira de Armazenamento (Brasil)(Especial Café - no.7)* , 37–43.
- Białobrzewski, I. (2007). Determination of the mass transfer coefficient during hot-air-drying of celery root. *Journal of Food Engineering*, 78, 1388–1396. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.011>
- Bird, R. (2006). *Fenómenos de transporte*. LIMUSA WILEY (Vol. 2). <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- Calhoun, A., & Golmanavich, J. (2012). *Plastics Technician's Toolbox*. (J. G. Allison R. Calhoun, Ed.) (2nd ed.). Society of Plastics Engineers.
- Castillo, Y. (universidad de los A. (2011). SECADO.
- CORPOICA. (2000). El cultivo de la sandía o patilla (*citrullus lantus*) en el departamento del Meta. *Manual de Asistencia Técnica*, (7).
- Delgado, T., Pereira, J. A., Baptista, P., Casal, S., & Ramalhosa, E. (2014). Shell's influence on drying kinetics, color and volumetric shrinkage of *Castanea sativa* Mill. fruits. *FRIN*, 55, 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.11.043>
- Doymaz, I. (2012). Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices

- (Diospyros kaki L.). *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 56, 199–205.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.11.027>
- Durán, R., Villegas, M. E., & Nieves, I. (2017). Caracterización y extracción de citrulina de la corteza de la sandía (*Citrullus lanatus* “ thumb ”) consumida en Valledupar. *TEMAS AGRARIOS*, 22(1), 61–68.
- Falade, K. O., Igbeka, J. C., & Ayanwuyi, F. A. (2007). Kinetics of mass transfer , and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *Journal of Food Engineering*, 80, 979–985. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.033>
- Fila, W., Itam, E., Johnson, J., Odey, M., Effiong, E., Dasofunjo, K., & Ambo, E. (2013). Comparative Proximate Compositions of Watermelon *Citrullus Lanatus*, Squash *Cucurbita Pepo*’1 and Rambutan *Nephelium Lappaceum*. *International Journal of Science and Technology*, 2(1), 81–88.
- Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. *CECSA. University of Minnesota. Mexico*, (3), 1024. <https://doi.org/9789682613166>
- Gomez, J. E. (1991). *El melón y la sandía* (Editorial). Caracas (Venezuela).
- Gornicki, K., & Kaleta, A. (2007). Drying curve modelling of blanched carrot cubes under natural convection condition. *Journal of Food Engineering*, 82, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.002>
- Haj, A., Yusof, Y., Rahman, R., Ganjloo, A., & Ling, C. (2014). Effect of osmotic dehydration process using sucrose solution at mild temperature on mass transfer and quality attributes of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*). *International Food Research Journal*, 21(2), 625–630.
- Hassan-Beygi, S. R., Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Massah, J. (2009). Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. *International Agrophysics*, 23(2), 129–135.
- Hii, C. L., Law, C. L., & Cloke, M. (2009). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of Food Engineering*, 90, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.022>

- Ibarz Ribas, A., & Barbosa Cánovas, G. V. (2011). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Mundi-Prensa.*
- Jaturonglumert, S., & Kiatsiriroat, T. (2010). Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, 100, 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.007>
- Karim, M. A., & Hawlader, M. N. A. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23–24), 4914–4925. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.035>
- Kaya, A., Ayd, O., & Dincer, I. (2008). Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa Planch*). *Journal of Food Engineering*, 88, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.017>
- Khan, M. I. H., Kumar, C., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. (2016). Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials. *Drying Technology*, 35(3), 335–346. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1170700>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>
- Lemus-mondaca, R. A., Zambra, C. E., Vega-gálvez, A., & Moraga, N. O. (2013). Coupled 3D heat and mass transfer model for numerical analysis of drying process in papaya slices. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.050>
- McCabe, Warren L.; Smith, Julian C.; Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (SÉPTIMA ED). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Montes, E., Torres, R., Andrade, R., Perez, O., Marimon, E., & Meza, I. (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (*dioscorea rotundata*) en capa delgada. *Revista Ingeniería E Investigación.*, 28(2), 45–52.
- Moreira, R., Chenlo, F., Chaguri, L., & Vázquez, G. (2005). Mathematical Modelling of the

- Drying Kinetics of Chestnut (*Castanea Sativa* Mill.). *Food and Bioproducts Processing*, 83(4), 306–314. <https://doi.org/10.1205/fbp.05035>
- Ndukwu, M. C., Dirioha, C., Abam, F. I., & Ihediwa, V. E. (2017). Case Studies in Thermal Engineering Heat and mass transfer parameters in the drying of cocoyam slice. *Case Studies in Thermal Engineering*, 9(December 2016), 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.12.003>
- Nichols, M. J. C. B. (1998). *Producción de melones y sandias*. (Agricultur, Vol. 2).
- Oberoi, D. P. S., & Sogi, D. S. (2015). Prediction of lycopene degradation during dehydration of watermelon pomace (cv Sugar Baby). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.03.003>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables : A Review. *Food Science and Food Safety*, 15. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
- Portela, J. V. F., Pessoa, T. R. B., Lima, J. P., & El-Aouar, Â. A. (2015). Evaluation mass transfer during the drying of watermelon rind to obtain and characterize its flour. *RECYT*, 23, 18–24.
- Quintero, J. J. (1981). Cultivo de Melón y Sandia. «*Hojas Divulgadoras Del Ministerio de Agricultura Y Pesca*, 2–3.
- Rahman, S. (1995). *Food Properties Handbook* (second). Boca Roton: Tayolor And Francis Group.
- Reyes Chaparro, J., Duran Baron, R., Arballo, J. ., & Campañone, L. . (2016). Secado de café pergamino por lecho fluidizado con asistencia de microondas. VI Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos Córdoba/Argentina. ISBN: 978-987-45380-0-0.
- Ruiz, I.; Hernandez, W.; Salgado, M. . R. (2008). Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.025>

- S. Garcia, M. Schmalko, a. T. (2007). ISOTERMAS DE ADSORCIÓN Y CINÉTICA DE SECADO DE CIERTAS HORTALIZAS Y AROMÁTICAS CULTIVADAS EN MISIONES, *36*(1), 115–129.
- Sánchez, J. E. B., Ortiz, M. I. C., Aguilar, Á. R. S., & Aguilar, R. G. S. (2015). ELABORACIÓN DE HARINA A BASE DE LA CORTEZA DE MELÓN Y SANDÍA EN EL CANTÓN SAN MIGUEL DE BOLÍVAR. *Revista Científica HORIZONTE EMPRESARIAL*, *2*(1).
- Santos, G. R. Dos, Castro Neto, M. D. De, Almeida, H. S. De, Ramos, L. N., Sarmiento, R. a, Lima, S. D. O., ... Neto, M. D. D. C. (2009). Effect of nitrogen doses on disease severity and watermelon yield. *Horticultura Brasileira*, *27*(3), 330–334. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362009000300012>
- Sfredo, M. A., Finzer, J., & Limaverde, J. R. (2005). Heat and mass transfer in coffee fruits drying. *Journal of Food Engineering*, *70*, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.09.008>
- Torregroza-Espinosa, A. M., Montes-Montes, E. J., Ávila-Gómez, A. E., & Remolina-López, J. F. (2014). Kinetic modelling of drying of three varieties of yucca industrial. *Dyna*, *81*(186), 184–192. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.39923>
- Torrez, R. M., & Giner, S. A. (2017). Modeling thin layer drying-roasting kinetics of soaked quinoa . Coupled mass and energy transfer. *Biosystems Engineering*, *157*, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.03.003>
- Treybal, R. E. (2013). *Operações de Transferência de Massa*. (AMELIA GARCÍA RODRÍGUEZ & DR. FRANCISCO JOSÉ LOZANO, Eds.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (2nd ed., Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Tzempelikos, D. A., Mitrakos, D., Vouros, A. P., Bardakas, A. V, Filios, A. E., & Margaris, D. P. (2015). Numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of cylindrical quince slices. *JOURNAL OF FOOD ENGINEERING*, *156*, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.01.017>

- Urfalino, D., & Worlock. (2014). Optimización de hornos industriales para deshidratado de ciruelas. *Revista de Investigación Agropecuaria (RIA)*, 60–66. Retrieved from <http://www.scielo.org.ar/pdf/ria/v40n1/v40n1a10.pdf>
- Virgen, L., Herrera, E. J., Espinosa, H., Guatemala, G. M., Corona, R. I., & Arriola, E. (2016). Estimacion del coeficiente de difusividad durante el tostado de cafe en un lecho fuente utilizando un modelo difuso. *Revista Mexicana de Ingeniera Quimica*, 15(2), 513–524.
- Yildiz, A., Koray Palazoğlu, T., & Erdoğdu, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.021>

12. ANEXOS

Anexo 1. Regresión lineal de la ley de Fick para cada uno de los tratamientos

