



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Secado artificial del *Plantago major* (llantén) y *Justicia pectoralis* var. 'Pectoralis' (tilo)

Artificial drying of *Plantago major* (plantain) and *Justicia pectoralis* var. 'Pectoralis' (linden)

✉ Yaisely Orquídea Hernández Fernández*, ✉ Michely Vega León, ✉ Mirian Catalina Gordillo Orduño,
✉ Yurisleisy Duartes Morales, ✉ Leonor Pérez Rodríguez

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt", (INIFAT) MINAG. Calle 188, # 38754 e/ 397 y Linderos, Santiago de las Vegas, Boyeros, La Habana, Cuba

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Recibido: 14/06/2021
Aceptado: 07/02/2022

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

CORRESPONDENCIA

Yaisely Orquídea Hernández Fernández
quimicapost@inifat.co.cu



Cu-ID: <https://cu-id.com/2153/cag042222362>

RESUMEN

El estudio caracterizó la dinámica de salida del agua durante el secado artificial del llantén (*Plantago major* L.) y el tilo (*Justicia pectoralis* J. var. 'Pectoralis'). Los ensayos se realizaron a 40 °C de temperatura y 50 % de humedad relativa. Se estableció inicialmente el flujo postcosecha y la determinación del contenido de humedad inicial de cada planta por el método gravimétrico. La caracterización cinética se realizó a partir de las determinaciones de las constantes de secado y los coeficientes de difusión de cada especie. Las constantes de secado fueron obtenidas a partir del ajuste matemático de cinco modelos y el coeficiente de difusión se obtuvo a través de la solución analítica de la segunda ley de Fick. La ecuación de mejor ajuste fue la Henderson y Pabis. Dicho modelo caracterizó la pérdida de humedad en el tiempo cuando se emplea una tecnología con 40 °C de temperatura y 50 % de humedad relativa y describió el mecanismo de difusión que ocurre en las hojas de las especies en estudio. La duración del secado del tilo en 45 h a diferencia del llantén que demora 77 h, se asocia a los pocos puntos de adsorción con enlaces relativamente fuertes que presenta la planta. Los resultados constituyen un aporte al conocimiento que permite optimizar los procesos de secado de las especies en estudio en las condiciones tecnológicas de Cuba.

Palabras clave: difusión, dinámica de extracción, plantas medicinales

ABSTRACT

The study characterized the water outflow dynamics during artificial drying of plantain (*Plantago major* L.) and linden (*Justicia pectoralis* J. var. 'Pectoralis'). The trials were conducted at 40 °C temperature and 50 % relative humidity. The post-harvest flow and the determination of the initial moisture content of each plant were initially established by the gravimetric method. The kinetic characterization was carried out based on the determination of the drying constants and diffusion coefficients of each species. The drying constants were obtained from the mathematical adjustment of five models and the diffusion coefficient was obtained through the analytical solution of Fick's second law. The best fitting equation was the Henderson and Pabis equation. That model characterized the moisture loss over time when using a technology with 40 °C temperature and 50 % relative

humidity and described the diffusion mechanism occurring in the leaves of the species under study. The drying time of linden in 45 h as opposed to plantain, which takes 77 h, is associated with the few adsorption points with relatively strong bonds that the plant presents. The results constitute a contribution to the knowledge that allows optimizing the drying processes of the species under study in the technological conditions of Cuba.

Keywords: diffusion, extraction dynamics, medicinal plants

INTRODUCCIÓN

El llantén (*Plantago major* L.) de la familia Plantaginaceae y el tilo (*Justicia pectoralis* J. var. *pectoralis*) de la *Acanthaceae*, son especies medicinales reconocidas en el Cuadro Básico de Salud de Cuba por sus amplias aplicaciones en el tratamiento de diferentes dolencias. Uno de los métodos más empleado para la conservación de estas especies es el secado (Thamkaew *et al.*, 2021). Este es un proceso que ocurre cuando es removido el vapor de agua desde la superficie del material hacia el espacio circundante.

Existen dos formas para deshidratar las plantas medicinales: natural o artificial. El método más antiguo es el secado al sol, muy utilizado en regiones de clima cálido y seco, pero muy prolongado por su dependencia de las condiciones climatológicas (Hernández *et al.*, 2018a). En cambio, el empleo de parámetros termodinámicos constantes en el proceso artificial propicia que la remoción del agua sea más rápida.

Por otro lado, la deshidratación resulta más o menos sencilla según el órgano de la planta a secar. Las hojas, por ejemplo, son generalmente fáciles de tratar, no así los tallos y ramas, pero en cualquiera de estos casos, el agua es el líquido evaporado y el aire es el agente secante que se emplea comúnmente.

A su vez, si en la elaboración de un fitoproducto la materia prima a utilizar procede de plantas secas, el secado constituye un punto crítico en el procesamiento. De no lograrse el contenido de humedad que garantice la calidad durante el almacenamiento y el procesamiento, no es posible corregir esta variable en etapas posteriores y por tanto se afecta la calidad del producto final (Pantoja *et al.*, 2016).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar la dinámica de salida del agua durante el proceso de secado artificial de las hojas de llantén y tilo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos se realizaron en el Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt" (INIFAT), ubicado en Santiago de las Vegas, La Habana, Cuba. En una primera etapa se establecieron parcelas experimentales que contaban con surcos de 8 x 6 m y canteros de 7 x 1 m para la siembra del tilo y el llantén, respectivamente. El flujo de trabajo se estableció como se muestra en la figura 1.

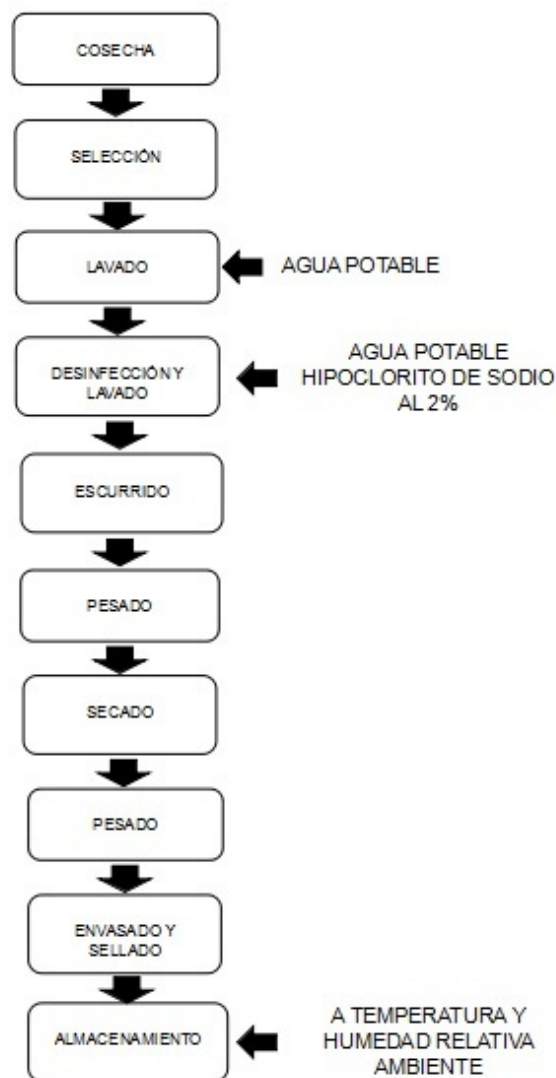


Figura 1. Flujo postcosecha empleado en esta investigación

El manejo postcosecha utilizado se describe a continuación:

- Cosecha: El órgano a cosechar fueron las hojas y se realizó según las instrucciones descrita en el manual de cultivo (Fuentes *et al.*, 2000).
- Pesado: todas las hojas cosechadas fueron pesadas en una balanza técnica digital (Radwag, Polonia) con una sensibilidad de 0,01 g.
- Selección, lavado, desinfección y escurrido: Se eliminaron las hojas con daños y se beneficiaron con

agua potable y una solución de hipoclorito de sodio al 2% durante 3 min cada una.

- Pesado: todas las hojas cosechadas fueron pesadas en una balanza técnica digital (Radwag, Polonia) con una sensibilidad de 0,01 g y posteriormente se determinó la humedad mediante el método gravimétrico (AOAC,1990).
- Secado: se empleó la tecnología artificial.

En la deshidratación se utilizó una estufa (Memmert, Alemania), con flujo de aire axial a 40 °C y una humedad relativa promedio de 50 %. Las hojas se depositaron en pesafiltros de metal con una capacidad máxima de 10 g distribuidos, de forma uniforme en el interior de la cámara de secado (Figura 2).

En el llenado de los recipientes se tuvo en cuenta que la cantidad de material facilitara el intercambio de masa y energía al interior de la cámara de secado. La masa vegetal para cada especie fue de 257 g. En el caso del llantén se distribuyeron 7,1 ± 1,8 g por cada frasco de pesada, mientras que para el tilo fueron distribuidos 8,8 ± 7,4 g de material vegetal.

En cada proceso se tomaron entre seis y diez muestras en distintos momentos para evaluar la pérdida de humedad (MR), a través del método gravimétrico. El tiempo de secado se midió con un cronómetro y se estableció a partir de la colocación de las muestras en la cámara de secado y la finalización del proceso, definido cuando las muestras llegaron al peso constante durante dos pesadas consecutivas.

- Pesado: todas las hojas cosechadas fueron pesadas en una balanza técnica digital (Radwag, Polonia) con una sensibilidad de 0,01 g.
- Envasado y Sellado: se realizó inmediatamente al concluir el proceso de secado y se garantizó que el sellado fuese hermético. Los envases utilizados fueron bolsas de permeabilidad selectiva y frascos de vidrio.
- Almacenamiento: se almacenó en condiciones de temperatura y humedad relativa ambiental, a la sombra y separada de otras plantas con las que pudieran intercambiar olores.

Cinética de secado de las hojas de llantén y tilo

La caracterización cinética del secado se realizó a partir de las determinaciones de la constante de secado (k) y el coeficiente de difusión (D) de cada planta.

Constante de secado

La constante de secado de cada proceso fue obtenida del modelo matemático que mejor ajustó los valores de MR en el tiempo. Para ello se emplearon las ecuaciones de la tabla 1 y la selección del modelo estuvo en función del mayor



Figura 2. Secado artificial de las hojas de tilo

coeficiente de correlación lineal (R²) y menor porcentaje de error medio relativo (% E).

Tabla 1. Modelos matemáticos utilizados para la caracterización cinética de secado (Hernández *et al.*, 2018b)

Ecuación	Modelo matemático	Ecuación
$MR = e^{-kt}$	Lewis	1
$MR = e^{-kt^n}$	Page	2
$MR = e^{(-k * t)^n}$	Page modificado	3
$MR = ae^{-kt}$	Henderson y Pabis	4
$MR = ae^{-kt} + (1 - a)e^{-kBt}$	Aproximación a la difusión	5

Dónde:

MR: contenido de humedad en g de agua g de masa seca⁻¹

t: es el tiempo de secado (h)

k: es la constante de secado

a, b, B y n: son coeficientes de ajuste

Coeficiente de difusión

En la determinación de D se empleó la segunda ley de Fick (Ecuación 6).

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{eff} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

Al integrar la ecuación 6 se establecieron las siguientes condiciones de fronteras:

- El movimiento difusional del agua se efectúa de manera plana.
- Inicialmente (t = 0) el contenido de humedad es uniforme.
- La geometría de la hoja es constante durante el secado.

Se obtiene analíticamente D:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[\frac{-D_{eff}t}{z^2} \frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4}\right] \quad (7)$$

A partir de la linealización de la ecuación 7 para tiempos largos, se obtiene la relación entre la pérdida de peso y *D* (Ecuación 8):

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi}\right) - \left[\frac{D_{eff}\pi^2}{4z^2}\right] * t \quad (8)$$

A su vez, se obtuvo la relación entre *k* y *D* (Ecuación 9):

$$D_{eff} = \frac{k\delta^2}{\pi} \quad (9)$$

Donde:

D: coeficiente de difusión (m² s⁻¹)

δ : espesor de la hoja (m)

J: constante

t: tiempo de secado (s)

Las dimensiones de las hojas (largo, ancho y espesor) se determinaron a partir de 50 muestras colectadas y medidas con el empleo de un micrómetro. El espesor se determinó a partir de 50 hojas colectadas y medidas con el empleo de un pie de rey.

Todos los resultados fueron procesados con el empleo del paquete estadístico de **STATGRAPHICS Plus, versión 5,0 para Windows 2000**.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas de secado ajustadas se muestran en las figuras 3 y 4. El modelo seleccionado como el de mejor ajuste para ambas plantas fue el de Henderson y Pabis con un R² de 0,76 y un % E de 25,9 para el tilo, mientras que para el llantén los estadígrafos fueron R²=0,99 y % E=46,4.

La variación del contenido de humedad en la curva de Henderson y Pabis durante la primera etapa del secado para ambas especies se comportó de forma lineal. La disminución brusca de la pendiente en ese periodo corroboró la extracción del agua que se encuentra menos ligada al sistema biológico, es decir, el agua libre (Hernández et al., 2018a; Guiné et al., 2019).

Se observó que el llantén a las 24 h presentó un punto de inflexión, en ese momento las hojas habían perdido el 57,4 % del peso inicial. Sin embargo, en el tilo el cambio en la pendiente se encontró a las 21 h, cuando ya se había extraído el 41,7 % del peso.

Hernández et al. (2018a,b) demuestran que en el punto de inflexión ha sido evaporada casi toda la capa de agua libre de la superficie de las hojas, por lo que el tiempo de culminación del proceso de secado depende de la transferencia de masa en cada especie en función del contenido de humedad.

La pérdida de humedad decrece lentamente luego del punto de inflexión en cada proceso, lo que indicó el

comienzo de fenómenos difusionales y la extracción del agua ligada a la estructura de los tejidos. Estos resultados concuerdan con lo obtenido para las hojas de orégano (*Plecthrantus amboinicus* (Lour.) Spreng) (Hernández et al., 2018b). Posteriormente al punto de inflexión, se observaron diferencias significativas en los tiempos de proceso (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes de cada una de las curvas obtenidas en esta investigación

Plantas	H (%bh)	a (g g ms ⁻¹)	k (h ⁻¹)	Tiempo (h)
Tilo	77,3	2,7508 a	0,09 a	45 a
Llantén	88,8	7,5187 b	0,12 a	77 b

Letras diferentes difieren significativamente con p ≤ 0,05

Leyenda: H (%bh): contenido de humedad; a: constante del modelo (g g ms⁻¹); k: constante de secado (h⁻¹) y t: tiempo de secado (h)

Rodríguez et al. (2005) plantean que el secado de hojas carnosas de orégano francés en estufa a 40 °C demora unos 6 días, mientras que en similares condiciones las ramas de diferentes especies de menta (*Mentha* sp. L.) tarda entre 2 y 3 días.

Esto se debe a que el tiempo de secado está influenciado por numerosos factores entre los que se encuentran la planta y sus características desde el punto de vista de su consistencia (Choque et al., 2021). Es por ello que el pequeño espesor de las hojas de tilo y llantén permitió alcanzar rápidamente el calor de vaporización, lo cual facilitó el movimiento del agua hacia la superficie y por tanto un menor tiempo de proceso. No obstante, se constataron diferencias significativas entre los tiempos obtenidos para cada especie.

Las hojas de tilo presentan pocos puntos de adsorción con enlaces relativamente fuertes, lo que implica que el proceso de extracción de humedad puede realizarse rápidamente (Hernández, 2017). Hernández et al. (2018 a) midieron un tiempo de 49 h en el secado solar de esta especie. Las diferencias con este estudio pueden deberse al contenido de humedad, los parámetros termodinámicos o a la tecnología de deshidratación utilizada.

En cambio, para el llantén, a diferencia de los estudios realizados por Rodríguez et al. (2005) durante el secado artificial a 50 °C de las hojas de llantén menor (*Plantago lanceolata* L.), logran un tiempo de proceso de 48 h, periodo menor al obtenido en esta investigación. Independientemente de las diferencias entre las especies, el resultado indicó que el elevado contenido de humedad inicial generó que la dinámica de extracción de humedad en estas hojas fuera más lenta.

La tabla 3 muestra los valores de los coeficientes de difusión, de las especies de plantas utilizados en esta

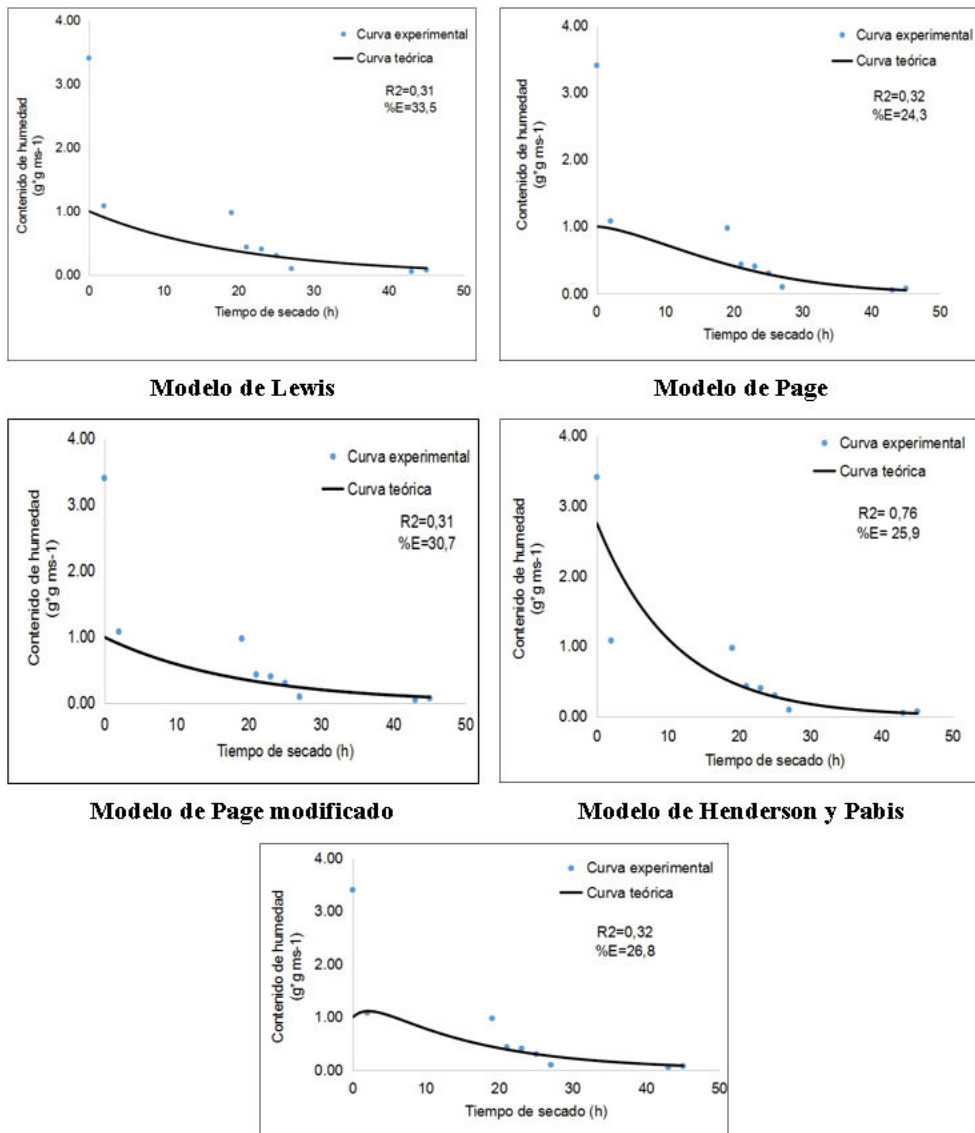


Figura 3. Curvas de secado ajustadas a los diferentes modelos para las hojas de tilo

investigación, ubicados en el rango de 10^{-13} y 10^{-6} m² s⁻¹, lo que concuerda a lo reportado por otros autores para diversos materiales biológicos (Campo, 2014; Tafur, 2018).

Tabla 3. Coeficientes de difusión de cada planta utilizada en esta investigación

Plantas	Coefficientes de difusión (10 ⁻¹³ m ² s ⁻¹)
Tilo	0,17 a
Llantén	5,13 b

Letras diferentes difieren significativamente con p ≤ 0,05

Salazar (2020) plantea que la difusividad efectiva (D_{eff}) representa la facilidad con que el agua se difunde en el

medio que lo rodea y depende de la naturaleza del material vegetal que la contiene, así como, del medio circundante. Esto explica las diferencias significativas obtenidas en el estudio, independientemente de la influencia que haya tenido sobre este coeficiente la temperatura.

Los materiales fibrosos como las hojas, se contraen al eliminarse la humedad y desarrollan una capa superficial dura e impermeable al flujo de líquido o de vapor, debido a que cuando se difunde el agua hacia la superficie, arrastra materiales solubles como los azúcares y las sales, que al evaporarse dificultan el secado y disminuyen la difusividad del agua (Rodríguez *et al.*, 2005).

La forma aplanada y el pequeño espesor de las hojas de tilo y llantén provocaron que estas se adhirieran unas a otras y se limitara el espacio para el paso del aire, lo cual derivó en

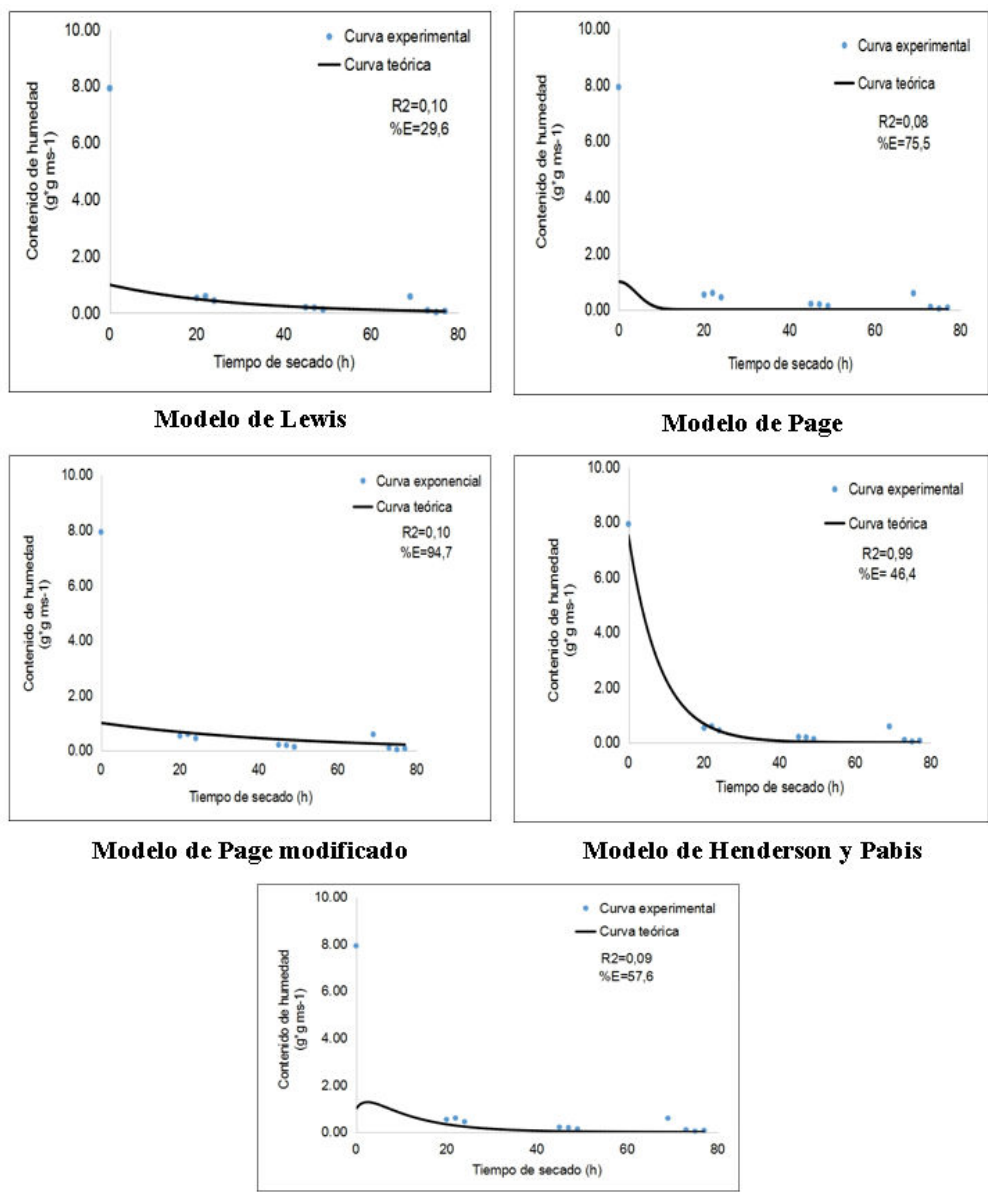


Figura 4. Curvas de secado ajustadas a los diferentes modelos para las hojas de llantén

bajos coeficientes de difusión en comparación con otras especies (Tafur, 2018). Esto está en correspondencia con el tipo de tejido, la geometría de la parte anatómica a secar y la mayor contracción que sufren estas hojas durante el proceso de secado.

CONCLUSIONES

A partir del modelo Henderson y Pabis se pudo caracterizar la pérdida de humedad en el tiempo cuando se emplea una tecnología con 40 °C de temperatura y 50 % de humedad relativa, así como describir el mecanismo de difusión que ocurre en las hojas de las especies en estudio.

Se necesitan 45 h para el secado del tilo, a diferencia del llantén que necesita 77 h, lo que se asocia a los pocos puntos de adsorción con enlaces relativamente fuertes que presenta la planta. Los resultados constituyen un aporte al conocimiento que permite optimizar los procesos de secado de las especies en estudio en las condiciones tecnológicas de Cuba.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yaisely Orquídea Hernández Fernández: Diseñó y concibió la investigación. Seleccionó los modelos utilizados y realizó a través del programa de Excel el ajuste matemático

de los resultados. Realizó todo el análisis matemático de la ley de Fick para obtener la correlación entre el coeficiente de difusión y la constante de secado. Analizó, interpretó y discutió los resultados del análisis estadístico y redactó el borrador del artículo.

Michely Vega León: Estableció el diseño experimental para la producción del llantén y el tilo. Contribuyó en la aplicación de las técnicas estadísticas utilizadas para analizar los datos de estudio obtenidos. Hizo la revisión crítica del artículo y recomendó modificaciones, supresiones y adiciones al documento.

Mirian Catalina Gordillo Orduño: Asesoró técnicamente el experimento mediante el montaje de la técnica gravimétrica. Desarrolló la metodología seguida en la ejecución del experimento. Contribuyó en la preparación, creación y presentación del trabajo publicado.

Yurisleisy Duartes Morales: Realizó la cosecha y el beneficio del tilo. Ejecutó las técnicas de secado artificial del tilo y la tabulación básica de los datos experimentales. Contribuyó en la preparación del trabajo publicado.

Leonor Pérez Rodríguez: Realizó la cosecha y el beneficio del llantén. Ejecutó las técnicas de secado artificial del llantén y la tabulación básica de los datos experimentales. Contribuyó en la preparación del trabajo publicado.

BIBLIOGRAFÍA

- A. O. A. C. 1990. Official Method of Analysis. Association of official analytical chemists, No. 934.06, Arlington, VA.
- CAMPO, F. J. 2014. Evaluación del secador mecánico para el secado de tomillo (*Thymus vulgaris*) y su contribución en las características finales del producto para obtener el cumplimiento de la norma NTC 4423 (ICONTEC, 1998). Tesis para optar por el título de Master. Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia. 164 p.
- CHOQUE, D., RAMOS, B. S., SOLANO, A. M., *et al.* 2021. Drying and color in punamuña leaves (*Satureja boliviana*). DYNA, 88 (216): 31-37.
- FUENTES, V., LEMES, C., RODRÍGUEZ, C., *et al.* 2000. *Manual de cultivo y conservación de plantas medicinales*. 2nd ed. Centenario, S. A., Cuba, 197 p.
- GUINÉ, R. P., FONTES, L. y REIS, M. J. 2019. Drying kinetics and mass transfer properties in the drying of thistle flower. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22: 1-13.
- HERNÁNDEZ, Y. O. 2017. Tecnología de secado solar del tilo (*Justicia pectoralis* J. var. *pectoralis*) para la Agricultura Urbana Cubana. Tesis para optar al título de Máster en Agricultura Urbana. Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt" (INIFAT), La Habana, Cuba, 95 p.
- HERNÁNDEZ, Y. O., SOCORRO, A., CALDERÓN, S., *et al.* 2018a. Caracterización de la cinética del secado solar en hojas de tilo (*Justicia pectoralis* J. var. *pectoralis*). *Revista Cubana de Física*, 35 (2): 102-107
- HERNÁNDEZ, Y. O., VEGA, M., SOCORRO, A., *et al.* 2018b. Cinética del secado solar del orégano (*Plecthrantus amboinicus* (Lour.) Spreng). *Agrotecnia de Cuba*, 42 (2): 72-85.
- PANTOJA, D., OSORIO, O., MEJÍA, D. F., *et al.* 2016. Procesamiento de Arvejas (*Pisum sativum* L.). Parte 1: Modelado de la Cinética de Secado por Capa Delgada de Arveja, Variedades Obonuco Andina y Sureña. *Revista de Información Tecnológica*, 27 (1): 69-80.
- RODRÍGUEZ, C. A., CARBALLO, C., HECHEVARRÍA, I., *et al.* 2005. Ahorro de energía en el secado de plantas medicinales. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 10 (1): 1-10.
- SALAZAR, E. 2020. Modelado de la cinética de secado por convección forzada de la semilla de pajuro (*Erythrina edulis* Triana). Tesis para optar al título de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú, 60 p.
- STATGRAPHICS Plus. 2000. Versión 5.0 para Windows. Versión estándar.
- TAFUR, H. J. 2018. Modelamiento de la cinética de secado de las hojas de sachaculantro (*Eryngium foetidum* L.) por convección forzada. Tesis para optar al título de Máster en Ingeniería de los Alimentos. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú, 70 p.
- THAMKAEW, G., SJÖHOLM, I. and GÓMEZ, F. 2021. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61 (11): 1763-178.

